

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID**

**ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR**



**Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de  
Telecomunicación**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**FOTODETECTORES EN LA BANDA DE INFRARROJOS,  
FIBRA ÓPTICA**

**Luis Vaquero Garzón**  
**Tutor: Andrés Castellanos-Gómez**  
**Ponente: Sergio López Buedo**

**ENERO 2016**



# **FOTODETECTORES EN LA BANDA DE INFRARROJOS, FIBRA ÓPTICA**

**AUTOR: Luis Vaquero Garzón**  
**TUTOR: Andrés Castellanos-Gómez**



**Instituto IMDEA Nanociencia**

**Dpto. Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones**  
**Escuela Politécnica Superior**  
**Universidad Autónoma de Madrid**  
**Enero de 2016**



# Resumen

Este Trabajo Fin de Grado (TFG) consiste en el estudio de un material alternativo para el canal de un fototransistor: el fósforo negro. La búsqueda de un nuevo material para el canal de un fototransistor proviene de la falta de escalabilidad del dispositivo con el tradicional canal de silicio que, aunque durante los últimos 50 años el tamaño de estos dispositivos se ha ido reduciendo notablemente, hoy en día se está muy cerca de llegar a un punto de estancamiento.

Se ha elegido el fósforo negro por varias razones. Debido a su estructura laminada se pueden obtener capas atómicamente finas, permitiendo reducir así las dimensiones del transistor y mejorar su rendimiento. Además, gracias a su estrecho *bandgap* directo, le permite ser utilizado para la detección de luz en una banda ancha del espectro y la recolección de energía, llegando hasta el rango de infrarrojo cercano.

En este trabajo, lo primero que hacemos es fabricar un fototransistor de efecto campo basado en MoS<sub>2</sub>, ya que es un material bien conocido y caracterizado, que nos servirá para comprobar que los métodos y montajes experimentales nos proporcionan resultados correctos. Aislamos copos del material de tan solo unos pocos átomos de espesor y determinamos las características eléctricas y optoelectrónicas de estos dispositivos.

Una vez comprobado el correcto funcionamiento y la calibración de nuestro montaje experimental, procedemos a fabricar un fototransistor de efecto campo, esta vez ya basado en el material a estudio, el fósforo negro, siguiendo los mismos métodos empleados que con los dispositivos de MoS<sub>2</sub>.

Con la caracterización del dispositivo basado en fósforo negro, demostramos que es un buen candidato para la fabricación de fototransistores ya que nuestro fotodetector tiene una responsividad bastante elevada (comparable con valores de fotodetectores comerciales basados en silicio) y un ancho de banda muy amplio, incluso respondiendo en la banda de infrarrojos de 1.2 a 1.55 micras (una banda del espectro crucial para la comunicación por fibra óptica).

## Palabras clave

Transistor, Transistor de efecto campo, Fototransistor, Fotodetector, Disulfuro de molibdeno, Fósforo negro, Infrarrojo, Longitud de onda, Semiconductor, Material bidimensional, Silicio, Electrodo, Telecomunicación, Optoelectrónica, Montaje experimental, Dispositivo, Fotorrespuesta



# Abstract

The scope of the present Bachelor Thesis is to study an alternative material for the channel of a phototransistor, the black phosphorus. The search for a new material for the channel of phototransistors is motivated by the issues to further scale down devices with the traditional silicon channels. Although during the last 50 years the size of these devices has been significantly reduced, today we are very close to reach an impasse.

We have chosen to study black phosphorus for several reasons. First, because its structure is laminated, one can isolate atomically thin layers by mechanical exfoliation, allowing to reduce the dimensions of the phototransistor and thus to improve their performance. Moreover, due to its narrow direct bandgap, it can be used for detection of light in a wide band of spectrum and energy harvesting, reaching the near-infrared range.

The first part of this thesis consists on the fabrication of a field effect phototransistor based on MoS<sub>2</sub>, as it is a well-known and characterized material which will be used to confirm that the methods and experimental setups provide us the correct results. We isolate a few atoms thick flakes of this bidimensional material and we determine the electrical and optoelectronic characteristics of these devices.

Once we have checked for the correct operation and calibration of our experimental setup, we proceed to fabricate a field effect phototransistor, based on the material under study, black phosphorus, using the same methods as with MoS<sub>2</sub> devices.

The characterization of black phosphorus-based photodetectors yields a good performance, meaning that the material is a good candidate for photodetection applications. This photodetector has a fairly high responsivity (comparable that of commercial silicon-based photodetectors) and a wide bandwidth, even responding in the infrared range from 1.2 to 1.55 microns (one critical band of the spectrum for optical fiber communication).

## Keywords

Transistor, Field-effect transistor, Phototransistor, Photodetector, Molybdenum disulfide, Black phosphorus, Infrared, Wavelength, Semiconductor, Two-dimensional material, Silicon, Electrodes, Telecommunication, Optoelectronic, Experimental setup, Device, Photoresponse





## ***Agradecimientos***

*Lo primero agradecer a mi tutor Andrés su paciencia, apoyo, dedicación y todo lo que me ha enseñado, sin él todo este trabajo no habría sido posible. También a Aday, por toda su ayuda y apoyo, así como a todos los compañeros que he conocido en IMDEA.*

*Gracias a mi ponente Sergio, por facilitarme toda la parte administrativa.*

*A mis padres Luis y Susana y mi hermana Ángela, por su apoyo constante durante tantos y tantos años y por todo lo que han hecho por mí. Especial mención a mis abuelos, los que ya no están entre nosotros y los que siguen ahí, por haber sido un pilar fundamental en mi vida y al resto de mi familia, gracias a todos por su confianza en todo momento.*

*Gracias a mis amigos, a los de toda la vida y que, por suerte, siguen a mi lado compartiendo momentos y experiencias. Y gracias a los nuevos y maravillosos amigos que he ido conociendo estos últimos años por tantos grandes momentos.*



## INDICE DE CONTENIDOS

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos.....	1
1.3	Organización de la memoria.....	2
2	Estado del arte .....	3
2.1	Fotodetectores en el NIR .....	3
2.1.1	Fotorresistencias .....	3
2.1.2	Fototransistores.....	4
2.1.3	Fotodiodos .....	4
2.2	Semiconductores bidimensionales.....	5
2.2.1	Dicalcogenuros de metales de transición (TMDCs).....	5
2.2.2	Fósforo negro.....	6
2.3	Fotodetectores basados en materiales semiconductores bidimensionales .....	7
3	Métodos experimentales .....	8
3.1	Fabricación de los fotodetectores bidimensionales .....	8
3.1.1	Preparación de los sustratos prefabricados (evaporación por máscara de sombra) .....	9
3.1.2	Transferencia de los semiconductores bidimensionales .....	11
3.2	Caracterización .....	13
3.2.1	Microscopía óptica .....	13
3.2.2	Caracterización electrónica.....	14
3.2.3	Caracterización optoelectrónica .....	16
4	Desarrollo .....	19
4.1	Fabricación de fototransistores de MoS <sub>2</sub> .....	19
4.2	Caracterización eléctrica de fototransistores de MoS <sub>2</sub> .....	20
4.3	Caracterización optoelectrónica de fototransistores de MoS <sub>2</sub> .....	21
4.3.1	Dependencia con la longitud de onda.....	22
4.3.2	Dependencia con la potencia .....	24
4.3.3	Respuesta temporal.....	26
5	Resultados.....	28
5.1	Fabricación de fototransistores de Fósforo negro.....	28
5.2	Caracterización eléctrica de fototransistores de Fósforo negro .....	28
5.3	Caracterización optoelectrónica de fototransistores de Fósforo negro.....	29
5.3.1	Dependencia con la longitud de onda.....	30
5.3.2	Dependencia con la potencia y respuesta temporal .....	31
6	Conclusiones y trabajo futuro.....	33
6.1	Conclusiones.....	33
6.2	Trabajo futuro .....	33
7	Publicaciones .....	33
	Referencias .....	34

# INDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1: ESTRUCTURA MONOCAPA DEL $\text{MoS}_2$ <sup>[9]</sup> .....	6
FIGURA 2-2: ESTRUCTURA MONOCAPA DEL FÓSFORO NEGRO <sup>[15]</sup> .....	6
FIGURA 3-1: ESQUEMA DEL DISPOSITIVO CON EL CANAL DE MATERIAL BIDIMENSIONAL, TRANSFERIDO ENTRE LOS ELECTRODOS (FUENTE Y DRENADOR). ESTE DISPOSITIVO SE BASA EN UN FET Y CUENTA CON DOS ELECTRODOS FABRICADOS CON ORO Y UNA CAPA DE DIELÉCTRICO QUE SEPARA LOS ELECTRODOS DE UNA CAPA DE SILICIO QUE ACTÚA COMO ELECTRODO DE PUERTA. ....	8
FIGURA 3-2: FOTO TOMADA A LA EVAPORADORA TÉRMICA DE LA SALA BLANCA PERTENECIENTE AL INSTITUTO IMDEA NANOCIENCIA. ....	9
FIGURA 3-3: VISTA SUPERIOR DE LA MÁSCARA DE SOMBRA UTILIZADA EN LA FABRICACIÓN DE LOS ELECTRODOS. ....	9
FIGURA 3-4: ESQUEMA DEL PROCESO DE EVAPORACIÓN POR MÁSCARA DE SOMBRA. SE PARTE DE UN SUSTRATO DE SILICIO (U ÓXIDO DE SILICIO) AL QUE SE LE DISPONE DE UNAS MÁSCARAS DE SOMBRA CON ABERTURAS EN FUNCIÓN DE LA FORMA EN QUE LO QUIERAS DEPOSITAR. A CONTINUACIÓN SE EVAPORA UNA CAPA DE ORO, DONDE UNA PARTE QUEDA ENCIMA DE LA MÁSCARA Y LO QUE NOS INTERESA SE DEPOSITA SOBRE EL SUSTRATO COMO UNA PELÍCULA FINA. ....	10
FIGURA 3-5: IMAGEN DE LOS ELECTRODOS DEL DISPOSITIVO DEPOSITADOS SOBRE EL SUSTRATO, TOMADA CON EL MICROSCOPIO ÓPTICO. ....	11
FIGURA 3-6: ESQUEMA DEL PROCESO DE TRANSFERENCIA DE COPOS DEL MATERIAL BIDIMENSIONAL ENTRE LOS ELECTRODOS DEL DISPOSITIVO. SE DISTINGUEN DOS PROCESOS, EL PRIMERO DE EXFOLIACIÓN A), B) Y C) EN EL QUE SE EXFOLIA EL MATERIAL DESDE UNA CINTA ADESIVA NITTO A UN PDMS Y POSTERIORMENTE SE BUSCA UN COPO ADECUADO A TRAVÉS DEL MICROSCOPIO ÓPTICO. EL SEGUNDO ES EL DE ESTAMPADO, D), E) Y F), EN EL QUE SE PROCEDE A LA TRANSFERENCIA DEL COPO DESDE EL PDMS A LOS ELECTRODOS DEL DISPOSITIVO. ....	11
FIGURA 3-7: FOTOGRAFÍA DEL MOMENTO DEL ESTAMPADO DE UN COPO SOBRE EL DISPOSITIVO Y DEL MONTAJE EXPERIMENTAL DE ESTAMPADO. ....	12
FIGURA 3-8: IMAGEN DE UN COPO DE $\text{MoS}_2$ TRANSFERIDO ENTRE LOS ELECTRODOS.....	13
FIGURA 3-9: FOTOGRAFÍA DEL MICROSCOPIO ÓPTICO DEL LABORATORIO.....	14
FIGURA 3-10: FOTOGRAFÍA DE UNA ESTACIÓN DE PUNTAS ( <i>PROBE STATION</i> ) CON EL DISPOSITIVO UNIDO MEDIANTE PINTURA DE PLATA PARA UN MEJOR CONTACTO CON LA PUERTA DEL DISPOSITIVO. SE DIFERENCIAN UNOS FLEJES QUE HACEN CONTACTO CON LOS ELECTRODOS, DOS CABLES SOLDADOS CON CADA FLEJE, QUE ACTUARÁN DE FUENTE Y DRENADOR, Y OTRO CABLE SOLDADO AL COBRE QUE ACTUARÁ DE PUERTA. A LA DERECHA DE LA FIGURA SE PUEDE VER UN ESQUEMA APROXIMADO DE LAS CONEXIONES. ....	15
FIGURA 3-11: ESQUEMA DEL MONTAJE EXPERIMENTAL DE MEDICIÓN Y CONEXIONES ELÉCTRICAS. DE LA FUENTE DE VOLTAJE TENMA SACAMOS EL $V_{\text{GATE}}$ Y DEL DISPOSITIVO KEITHLEY SACAMOS EL $V_{\text{SD}}$ . TANTO EL NEGATIVO DEL TENMA COMO DEL KEITHLEY SE CONECTAN AL DRENADOR DEL DISPOSITIVO, LO QUE SERÁ LA TIERRA COMÚN. EL POSITIVO DEL TENMA SE CONECTA A LA PUERTA DEL DISPOSITIVO Y EL POSITIVO DEL KEITHLEY SE CONECTA A LA FUENTE DEL DISPOSITIVO. LA FIBRA ÓPTICA SE CONECTA AL LED DE LONGITUD DE ONDA DESEADA Y A LA LENTE DE ZOOM DEL MONTAJE EXPERIMENTAL.....	16
FIGURA 3-12: FOTOGRAFÍA DE LA MESA DE LEDS DE POTENCIA, ORDENADOS POR SU LONGITUD DE ONDA EN NM: 375, 405, 455, 505, 617, 660, 850 Y 1050.....	17
FIGURA 3-13: MODULADOR DE SEÑALES YOKOGAWA Y MEDIDOR DE POTENCIAS THORLABS CON SENSOR PARA DIFERENTES LONGITUDES DE ONDA. ....	18
FIGURA 4-1: COPO TRICAPA DE $\text{MoS}_2$ DE $12.86 \mu\text{m} \times 17.98 \mu\text{m}$ TRANSFERIDO ENTRE LOS DOS ELECTRODOS FUENTE Y DRENADOR DEL DISPOSITIVO. ....	19
FIGURA 4-2: (A) GRÁFICA DE INTENSIDAD FUENTE-DRENADOR, $I_{\text{SD}}$ , FRENTE AL VOLTAJE FUENTE- DRENADOR $V_{\text{SD}}$ , PARA DIFERENTES VOLTAJES DE PUERTA, $V_{\text{GATE}}$ . EL BARRIDO EN VOLTAJE SE	

HA HECHO DE -2 A 2 V PARA CADA $V_{GATE}$ COMPRENDIDO EN EL RANGO DE -30 A 30 V EN PASOS DE 5 V. (B) GRÁFICA DE $I_{SD}$ FRENTE A $V_{GATE}$ , PARA DISTINTOS VALORES DE $V_{SD}$ . .....	20
FIGURA 4-3: (A) GRÁFICA QUE MUESTRA LA RESPUESTA DE LA MUESTRA EN OSCURIDAD Y A MÁXIMA POTENCIA PARA UN LED DE 455 NM CUANDO $V_{GATE}$ VALE -30 V. PODEMOS VER QUE PARA VOLTAJES MUY NEGATIVOS LA RESPUESTA A MÁXIMA POTENCIA ES CASI LA MISMA QUE EN OSCURIDAD. (B) GRÁFICA QUE MUESTRA LA RESPUESTA DE LA MUESTRA EN OSCURIDAD Y A MÁXIMA POTENCIA CUANDO $V_{GATE}$ VALE 0 V. LA MUESTRA YA REACCIONA BASTANTE MEJOR ANTE LA LUZ. (C) GRÁFICA QUE MUESTRA LA RESPUESTA DE LA MUESTRA EN OSCURIDAD Y A MÁXIMA POTENCIA CUANDO $V_{GATE}$ VALE +30 V. NOTAMOS UN CIERTO AUMENTO EN LA RESPUESTA RESPECTO AL DE 0 V. (D) GRÁFICA DE LA FOTOCORRIENTE ( $I_{SD}$ -MÁXIMA-POTENCIA - $I_{SD}$ -OSCURIDAD) EN FUNCIÓN DEL $V_{GATE}$ . .....	22
FIGURA 4-4: (A) GRÁFICA DE CURVAS CARACTERÍSTICAS $I_{SD}$ - $V_{SD}$ PARA CADA LONGITUD DE ONDA A UNA POTENCIA DE 100 nW, ADEMÁS DE LA CURVA EN OSCURIDAD. (B) GRÁFICA DE FOTOCORRIENTE (RESTA DEL VALOR DE LA CORRIENTE PARA 100 nW Y EN OSCURIDAD, AMBOS VALORES EN EL PUNTO DE 2 $V_{SD}$ ) PARA CADA UNA DE LAS LONGITUDES DE ONDA A UNA POTENCIA DE 100 nW. ....	23
FIGURA 4-5: GRÁFICA DE LA RESPONSIVIDAD FRENTE A LA LONGITUD DE ONDA PARA OTRO DISPOSITIVO DE $MOS_2$ MEDIDO DE CARACTERÍSTICAS SIMILARES. ....	24
FIGURA 4-6: A) CURVAS DE LA RESPUESTA DE LA MUESTRA A 455 NM Y C) A 617 NM A DIFERENTES POTENCIAS DE LED. B) GRÁFICA DE $I_{SD}$ FRENTE A LA POTENCIA DEL LED PARA 475 NM, EN ESCALA LOGARÍTMICA. LA RESPUESTA MEJORA BASTANTE EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA DEL LED. D) GRÁFICA DE $I_{SD}$ FRENTE A LA POTENCIA DEL LED PARA 617 NM, EN ESCALA LOGARÍTMICA. VEMOS QUE LA RESPUESTA AUN MEJORA EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA DEL LED. ....	25
FIGURA 4-7: GRÁFICA DE LA RESPONSIVIDAD FRENTE A LA POTENCIA DEL LED DE 455 NM PARA OTRO DISPOSITIVO DE $MOS_2$ MEDIDO DE CARACTERÍSTICAS SIMILARES. ....	26
FIGURA 4-8: CURVA $I_{SD}$ FRENTE AL TIEMPO ANTE UNA ONDA CUADRADA CON EL 50% DEL TIEMPO EN ON (LED ENCENDIDO) Y EL 50% EN OFF (LED APAGADO), PARA DISTINTOS VALORES PICO A PICO DE LA ONDA, TENIENDO EL MÁXIMO SOPORTADO EN 5 V. EL LED UTILIZADO FUE EL DE 455 NM. ....	27
FIGURA 5-1: COPO DE FÓSFORO NEGRO DE DIMENSIÓN 10 $\mu m$ X 38.5 $\mu m$ Y DE VARIAS CAPAS DE ESPESOR TRANSFERIDO ENTRE LOS ELECTRODOS DEL DISPOSITIVO. DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS 10 $\mu m$ . ....	28
FIGURA 5-2: A) GRÁFICA DE $I_{SD}$ FRENTE A $V_{SD}$ , PARA DIFERENTES $V_{GATE}$ . EL BARRIDO EN VOLTAJE SE HA HECHO DE -2 A 2 V PARA CADA $V_{GATE}$ COMPRENDIDO EN EL RANGO DE -30 V A 30 V EN PASOS DE 5 V. B) GRÁFICA DE $I_{SD}$ FRENTE A $V_{GATE}$ , PARA DISTINTOS VALORES DE $V_{SD}$ . EN ESTA GRÁFICA PODEMOS VER QUE EL MATERIAL ESTÁ DOPADO TIPO P YA QUE A VOLTAJES MENORES CONDUCE MÁS. ....	29
FIGURA 5-3: GRÁFICA DE $I_{SD}$ FRENTE AL TIEMPO EN LA QUE SE DISTINGUEN LAS FASES ON Y OFF DE RESPUESTA FRENTE A LA LUZ, EN ESTE CASO AL LED DE 455 NM. ....	30
FIGURA 5-4: A) GRÁFICA DE FOTOCORRIENTE (CORRIENTE ILUMINADO – CORRIENTE EN OSCURIDAD) FRENTE AL TIEMPO PARA VARIAS LONGITUDES DE ONDA. B) GRÁFICA DE RESPONSIVIDAD FRENTE A LA LONGITUD DE ONDA. ....	30
FIGURA 5-5: A) GRÁFICA DE $I_{SD}$ FRENTE AL TIEMPO EN EL QUE SE DISTINGUEN DIFERENTES CICLOS ON-OFF PARA DIFERENTES POTENCIAS. B) GRÁFICA DE RESPONSIVIDAD FRENTE A POTENCIA. ....	31

## INDICE DE TABLAS

TABLA 4-1: VALORES NUMÉRICOS DE LA RESPONSIVIDAD FRENTE A LA LONGITUD DE ONDA, CORRESPONDIENTES A LA FIGURA 4-5 .....	24
TABLA 4-2: VALORES NUMÉRICOS DE LA RESPONSIVIDAD FRENTE A LA POTENCIA DEL LED, CORRESPONDIENTES A LA FIGURA 4-7 .....	26
TABLA 4-3: CORRESPONDENCIA ENTRE LOS VALORES DE VOLTAJE PICO A PICO DE LA SEÑAL LED MODULADA EN LA FIGURA 4-8 CON SU POTENCIA CORRESPONDIENTE.....	27
TABLA 5-1: VALORES NUMÉRICOS DE LA RESPONSIVIDAD FRENTE A LA LONGITUD DE ONDA, CORRESPONDIENTES A LA FIGURA 5-4 B). .....	31
TABLA 5-2: VALORES NUMÉRICOS DE LA RESPONSIVIDAD FRENTE A LA POTENCIA DEL LED, CORRESPONDIENTES A LA FIGURA 5-5 .....	32

# 1 Introducción

---

## 1.1 Motivación

Nuevas aplicaciones en electrónica y optoelectrónica suelen venir de la mano de nuevos materiales, inexplorados hasta la fecha. Los materiales bidimensionales (cristales de pocos átomos de espesor que se obtienen por exfoliación de materiales laminados), son una prometedora familia en este contexto. Estos materiales, aislados por primera vez en 2004<sup>[1]</sup>, poseen características muy atractivas: flexibilidad, transparencia y una interacción fuerte con la luz.

Con el empleo de estos materiales bidimensionales se pretende suplir las carencias que el silicio, acomodado durante muchos años, empieza a mostrar, como la falta de escalabilidad nanométrica. A parte de la escalabilidad, estos materiales también son interesantes por su *bandgap*<sup>1</sup>, ya que permitiría desarrollar fotodetectores que absorban en un rango amplio del espectro electromagnético.

Dentro de estos materiales semiconductores bidimensionales nace de la necesidad de obtener dichos materiales con *bandgap* más pequeño (menor a 1eV) para ser empleados en diversas aplicaciones, como en la banda de telecomunicaciones (infrarrojo cercano, ~1500 nm), ya que hasta ahora los materiales bidimensionales aislados con este fin poseen el *bandgap* muy grande (mayores a 1eV), lo que no permite la detección de longitudes de onda mayores.

## 1.2 Objetivos

En el presente trabajo de fin de grado (TFG en adelante), se explorará el uso de semiconductores bidimensionales para la detección de luz en el infrarrojo cercano (NIR, de sus siglas en inglés). Este rango del espectro electromagnético es especialmente interesante dado que engloba a las longitudes de onda empleadas en la telecomunicación por fibra óptica.

Para ello se explorará el fósforo negro (bP, por sus siglas en inglés), un material semiconductor bidimensional aislado recientemente y del que todavía se conoce muy poco. El fósforo negro es un material interesante para la fabricación de transistores de efecto campo por sus características como su estrecho *bandgap* y el rendimiento que muestra ante los transistores tradicionales de silicio. El objetivo que se pretende alcanzar es fabricar fotodetectores basados en fósforo negro, que sean sensibles hasta longitudes de onda de 1500 nm, pertenecientes a la banda de las telecomunicaciones.

---

<sup>1</sup> Bandgap: denominado así por su nombre en inglés, es la diferencia de energía entre la parte superior de la banda de conducción y la parte inferior de la banda de valencia. Está presente en aislantes y semiconductores.

### ***1.3 Organización de la memoria***

La memoria consta de los siguientes capítulos:

- **Estado del arte**
- **Métodos experimentales**
- **Desarrollo**
- **Resultados**
- **Conclusiones y trabajo futuro**



## 2 Estado del arte

---

### 2.1 Fotodetectores en el NIR

Actualmente, la investigación y desarrollo de dispositivos eficientes capaces de detectar luz infrarroja es de suma importancia debido a la amplia gama de aplicaciones existentes tanto en la industria, como en el sector aeroespacial o militar.

El diseño y aplicación de los detectores sensibles al infrarrojo basados en Si ha sido de gran importancia. Los fotodetectores tipo Schottky IR<sup>[2]</sup>, han sido de particular interés debido a la ventajas de la arquitectura de un dispositivo simple, con baja corriente en oscuridad, elevada velocidad de respuesta y una pequeña capacitancia parásita. Para fabricar los fotodetectores Schottky IR, sin embargo, se utilizan varios siliciuros metálicos que, inevitablemente, resultará en un rendimiento del dispositivo inferior debido a su falta de transparencia y su baja conductividad eléctrica.

A continuación tratamos sobre los distintos tipos de fotodetectores empleados actualmente.

#### 2.1.1 Fotorresistencias

Una fotorresistencia<sup>[3]</sup> o resistencia dependiente de la luz (LDR, de sus siglas en inglés), también denominada fotocélula, es una resistencia variable controlada por la luz. La resistencia disminuye al aumentar la intensidad de la luz incidente. Una fotorresistencia puede aplicarse en circuitos detectores sensibles a la luz y en los circuitos de conmutación activados por luz u oscuridad.

Una fotorresistencia está hecha de un semiconductor de alta resistencia. En la oscuridad puede tener una resistencia del orden de varios megaohmios (MΩ), mientras que en exposición a la luz puede tener una resistencia de unos pocos cientos de ohmios. Si la luz incidente sobre una fotorresistencia excede una cierta energía, los fotones absorbidos por el semiconductor producen electrones ligados con energía suficiente para saltar desde la banda de valencia a la banda de conducción. Los electrones libres resultantes (y sus parejas de huecos) conducen la electricidad, lo que reduce la resistencia.

Un dispositivo fotoeléctrico<sup>2</sup> puede estar basado en semiconductores intrínsecos o extrínsecos. Un semiconductor intrínseco tiene pocos portadores de carga libre y, por tanto, no es un conductor eficiente como, por ejemplo, el silicio. En los dispositivos intrínsecos los únicos electrones disponibles están en la banda de valencia, y por lo tanto el fotón debe tener la energía suficiente para excitar el electrón a través del *bandgap*. Los dispositivos extrínsecos tienen impurezas, también llamados dopantes, cuyo estado de energía está más cerca de la banda de conducción; ya que los electrones no están tan lejos para saltar, los fotones de energía más bajos (es decir, longitudes de onda más largas) son suficientes para disparar el dispositivo.

---

<sup>2</sup> Dispositivo fotoeléctrico: dispositivo electrónico que responde al cambio en la intensidad de la luz.

### 2.1.2 Fototransistores

Un fototransistor es esencialmente un transistor, es decir, es un dispositivo electrónico semiconductor utilizado para entregar una señal de salida en respuesta a una señal de entrada y que, además, es capaz de aprovechar la energía de la luz incidente que recibe. Por esto, el fototransistor puede trabajar en modo común, como un transistor normal, o en modo iluminación generando corriente a partir de la luz. Los fototransistores suelen ser fabricados empleando silicio o germanio, como cualquier tipo de transistor bipolar y existen fototransistores tanto de unión NPN<sup>3</sup> como PNP<sup>4</sup>.

Al exponer el fototransistor a la luz, los fotones entran en contacto con la base del mismo, generando huecos y con ello una corriente de base que hace que el transistor entre en la región activa, y se presente una corriente de colector a emisor. La corriente de base total es igual a la corriente de base en modo común más la corriente de base por iluminación, aunque normalmente el fototransistor trabaja con el pin de la base sin conectar.

La característica más sobresaliente de un fototransistor es que permite detectar luz y amplificar la señal de entrada mediante el uso de un sólo dispositivo.

### 2.1.3 Fotodiodos

Un fotodiodo<sup>[4]</sup> es un dispositivo semiconductor de unión PN que convierte la luz que recibe en corriente. La corriente se genera cuando los fotones son absorbidos en el fotodiodo. Cuando un haz de luz de suficiente energía incide en el diodo, excita un electrón dándole movimiento y crea un hueco con carga positiva.

Los diodos funcionan en polarización directa. En ese sentido el diodo deja pasar la corriente eléctrica y, prácticamente, no lo permite en el inverso. En el fotodiodo la corriente es la que circula en sentido inverso al permitido, el fotodiodo es polarizado de manera inversa. Se producirá un aumento de la circulación de corriente cuando el diodo es excitado por la luz. En ausencia de luz la corriente presente es muy pequeña y recibe el nombre de corriente de oscuridad.

Los fotodiodos por lo general tienen un tiempo de respuesta más lento cuando su área de superficie aumenta. Una célula solar común no es más que una gran superficie de fotodiodos.

---

<sup>3</sup> NPN se refiere a una capa de material semiconductor dopado P (dopado con huecos), base, entre dos capas de material dopado N (dopado con electrones), emisor y colector.

<sup>4</sup> PNP se refiere a una capa de material semiconductor dopado N (dopado con electrones), base, entre dos capas de material dopado P (dopado con huecos), emisor y colector.

## 2.2 Semiconductores bidimensionales

Hace 70 años, el físico Lev Landau predijo que los cristales bidimensionales no podrían existir al no ser termodinámicamente estables<sup>[5]</sup>. Sin embargo, el descubrimiento del grafeno en 2004<sup>[6]</sup> refutó esta hipótesis. El grafeno, obtenido por primera vez por exfoliación mecánica de grafito, consiste en una red hexagonal de átomos de carbono que forman una capa de espesor atómico, es decir, una capa bidimensional, ya que las dimensiones en el plano son considerablemente mayores que el espesor del material. El hecho de que la estructura del grafeno esté confinada en el plano le dota de una serie de características realmente interesantes, tales como: alta transmitancia óptica, gran conductividad térmica y excelentes propiedades electrónicas y mecánicas<sup>[7,8]</sup>.

El descubrimiento del grafeno abrió la puerta a la investigación de materiales de tan solo unos átomos de espesor, atrayendo cada vez más la atención de la comunidad científica. Estos materiales se pueden aislar gracias a que poseen una estructura laminada. Estas estructuras presentan enlaces de interacción fuerte en el plano de unión, pero las fuerzas de interacción entre capas (fuerzas de Van der Waals<sup>5</sup>) es débil, algo que permite aislar fácilmente capas finas del material. Una de las familias de estos materiales que ha despertado mayor interés es la de los dicalcogenuros de metales de transición estratificados (layered transition-metal dichalcogenides, LTMDs), ya que pueden ser fácilmente divididos a lo largo de los niveles de capas. Propiedades como altas movilidades de portador<sup>[6,9]</sup>, transparencia óptica, ondas con densidad de carga y superconductividad hacen que los materiales bidimensionales sean muy atractivos en el área de investigación. El material bidimensional más investigado es el grafeno, la forma atómicamente delgada del grafito, del que se ha hablado anteriormente.

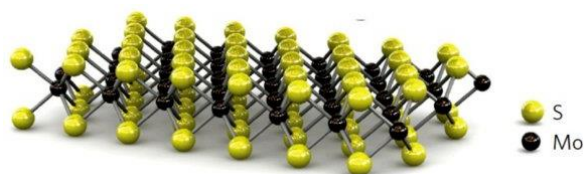
### 2.2.1 Dicalcogenuros de metales de transición (TMDCs)

Son una clase de materiales laminados que, a diferencia del grafito (compuesto sólo por átomos de carbono), están compuestos por dos tipos de átomos. Su estructura en el plano tiene forma de “sándwich” del tipo X-M-X, donde M es un átomo del grupo de metales de transición, como el molibdeno (Mo) o el tungsteno (W), y X representa átomos de calcogenos, como el azufre (S)<sup>[10]</sup>. En su forma bidimensional, a diferencia del grafeno, estos materiales poseen mayoritariamente un alto *bandgap* y un comportamiento semiconductor, siendo buenos candidatos para aplicaciones en transistores con un canal fino y para la investigación en nanociencia<sup>[11]</sup>.

Uno de estos compuestos es el disulfuro de molibdeno ( $\text{MoS}_2$ )<sup>[1,9]</sup>, cuya estructura en monocapa podemos ver en la Figura 2-1, conocido por su empleo como lubricante en su estado sólido. Es un semiconductor tipo-N, es decir, presenta un dopaje rico en portadores de carga negativos, que presenta una monocapa de unos 6.5 Å de espesor (unos 0.65 nm) y tiene unas propiedades físicas, ópticas y eléctricas únicas además de una gran eficiencia de luminiscencia cuántica.

---

<sup>5</sup> Incluye atracciones entre átomos, moléculas y superficies, así como otras fuerzas intermoleculares. Se diferencian de los enlaces covalente e iónico en que son causados por correlaciones en las polarizaciones fluctuantes de partículas cercanas.



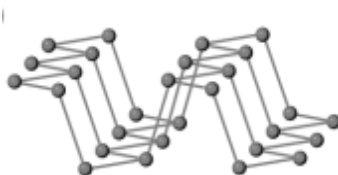
**Figura 2-1: Estructura monocapa del MoS<sub>2</sub><sup>[9]</sup>**

Por todo esto, se considera que el MoS<sub>2</sub> es un gran competidor del grafeno, también gracias a que cuenta con un *bandgap* directo de 1.8 eV en monocapa. También podría complementar al grafeno en aplicaciones que requieren semiconductores transparentes y delgados, tales como la optoelectrónica y la recolección de energía<sup>9</sup>. Los estudios experimentales y teóricos muestran que el MoS<sub>2</sub> es un material con gran perspectiva para la nanoelectrónica y energética solar, en particular, para la creación de una amplia clase de sensores, transistores, diodos y células solares<sup>[12]</sup>. Un fototransistor basado en MoS<sub>2</sub> puede ser usado como fotodetector en el rango de 450-700 nm. Una gran parte de los materiales bidimensionales tiene un rango de fotodetección similar debido a sus grandes *bandgaps*. Esto deja espacio para materiales bidimensionales que podrían usarse en un rango de detección mayor, debiendo tener un *bandgap* directo más pequeño.

### 2.2.2 Fósforo negro

Recientemente, un nuevo candidato a material bidimensional ha llamado la atención de muchos. El fósforo negro, el alótropo más estable del fósforo, ha sido estudiado sin gran profundidad desde 1960<sup>[13]</sup>. Desde entonces, muchos trabajos teóricos sobre su estructura de bandas en monocapa han sido publicados. Pero no ha sido hasta hace poco cuando se ha empezado a estudiar el fósforo negro en pocas capas<sup>[14]</sup>.

El fósforo negro es un material monoatómico que forma una estructura laminada, muy similar a la del grafeno, que podemos ver en la Figura 2-2. El fósforo negro en volumen tiene un *bandgap* directo de 0,3 eV. La teoría predice que este *bandgap* cambiaría gradualmente con la cantidad de capas, hasta 2 eV en monocapa. El *bandgap* permanecería directo cuando se reduce la cantidad de capas. Esto indica que se puede obtener un buen ratio on/off y una corriente baja en estado-off en los transistores basados fósforo negro<sup>[15]</sup>. Se prevé que el *bandgap* del fósforo negro con estructura de pocas capas sea mucho menor que en los dicalcogenuros de metales de transición. Esto indica que se puede fabricar un fototransistor con un amplio rango de detección, llegando hasta la parte del infrarrojo cercano en el espectro. Esto podría llenar la brecha entre el grafeno sin *bandgap* y los dicalcogenuros de metales de transición con un alto *bandgap*, como el MoS<sub>2</sub>.



**Figura 2-2: Estructura monocapa del fósforo negro<sup>[15]</sup>.**

## **2.3 Fotodetectores basados en materiales semiconductores bidimensionales**

El transistor de efecto campo (FET, por sus siglas en inglés) es uno de los dispositivos electrónicos más comunes. En la Figura 3-1 podemos ver un esquema de un FET en el que se indica sus principales elementos: tres terminales, denominados puerta (*gate*), drenador (*drain*) y fuente (*source*). La puerta es la terminal equivalente a la base en un transistor de unión bipolar. El canal del FET, a diferencia del canal de la figura, suele ser un material semiconductor como el silicio, material dominante en las últimas décadas<sup>[16]</sup>. El transistor de efecto de campo se comporta como un interruptor controlado por tensión, donde el voltaje aplicado a la puerta permite hacer que fluya o no corriente entre drenador y fuente.

Al igual que los transistores bipolares se dividen en NPN y PNP, los FET también se dividen en dos tipos, dependiendo de si la aplicación de una tensión positiva en la puerta pone al transistor en estado de conducción (tipo N, material dopado con electrones) o no conducción (tipo P, material dopado con huecos).

El problema de utilizar canales de silicio es la escalabilidad, ya que hacer estos dispositivos en escala nanométrica produce capacidades parásitas y fugas de corriente en el estado off que pueden llegar a ser significativas. Por esto, nace la necesidad de fabricar transistores basados en nuevos materiales que permitan la escalabilidad de las dimensiones manteniendo un buen ratio on/off, corriente baja en el estado off y una alta movilidad de portadores de carga.

Los materiales bidimensionales pueden ser usados como canales de un transistor. Estos canales tendrían varias capas atómicas de espesor, ofreciendo buenas posibilidades para llevar los transistores a una escala nanométrica. Además, el pequeño espesor reduce la proyección del voltaje de puerta sobre el canal, permitiendo así hacer transistores más eficientes que los basados en silicio.

## 3 Métodos experimentales

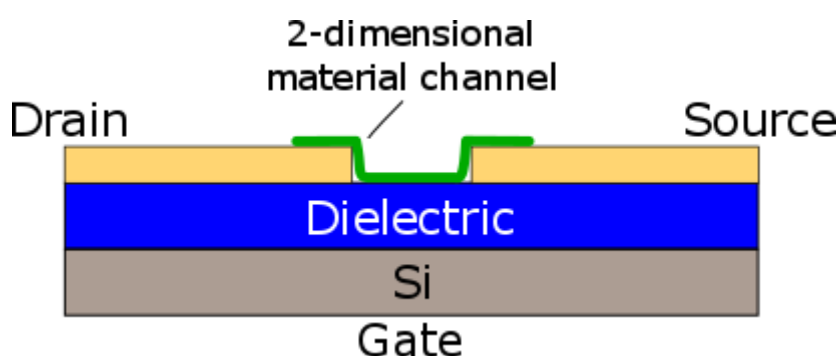
---

### 3.1 Fabricación de los fotodetectores bidimensionales

Una parte esencial de este proyecto es la fabricación de fototransistores basados en un material semiconductor bidimensional.

El desarrollo de esta fabricación es el que veremos a continuación en las siguientes subsecciones donde se explica cómo se preparan los sustratos mediante la técnica de evaporación por máscara de sombra y cómo se transfieren los copos de material semiconductor bidimensional.

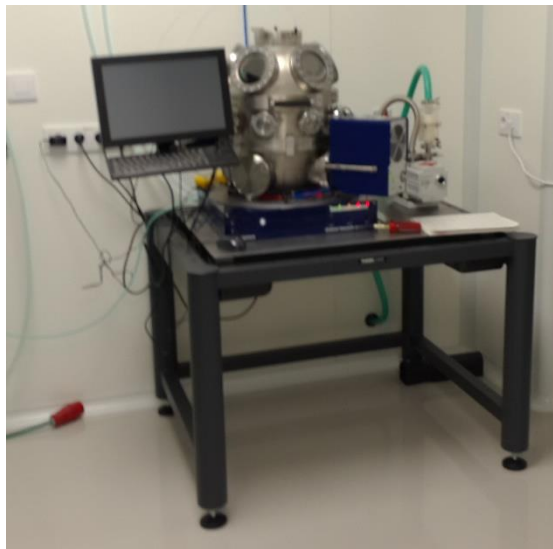
La forma final que tendrá nuestro fotodetector bidimensional será algo parecido a la del esquema que se muestra en la Figura 3-1.



**Figura 3-1:** Esquema del dispositivo con el canal de material bidimensional, transferido entre los electrodos (fuente y drenador). Este dispositivo se basa en un FET y cuenta con dos electrodos fabricados con oro y una capa de dieléctrico que separa los electrodos de una capa de silicio que actúa como electrodo de puerta.

### 3.1.1 Preparación de los sustratos prefabricados (evaporación por máscara de sombra)

Existen diversas técnicas para fabricar electrodos. La técnica más común empleada en investigación es la evaporación en vacío: un trozo de metal es calentado, ya sea mediante el uso de una resistencia o un haz de electrones, hasta su punto de ebullición, momento en el que una cierta fracción de átomos del material se evapora para condensarse después sobre la superficie fría del sustrato, en forma de película delgada<sup>[17]</sup>. La evaporación se realiza en una cámara en la que se hace un vacío de aproximadamente 10 Torr (0.01315 atm). Este vacío es indispensable para evitar que los metales se oxiden rápidamente. En la Figura 3-2 se muestra una fotografía de una de estas evaporadoras, en concreto a la perteneciente a la sala blanca del Instituto IMDEA Nanociencia.



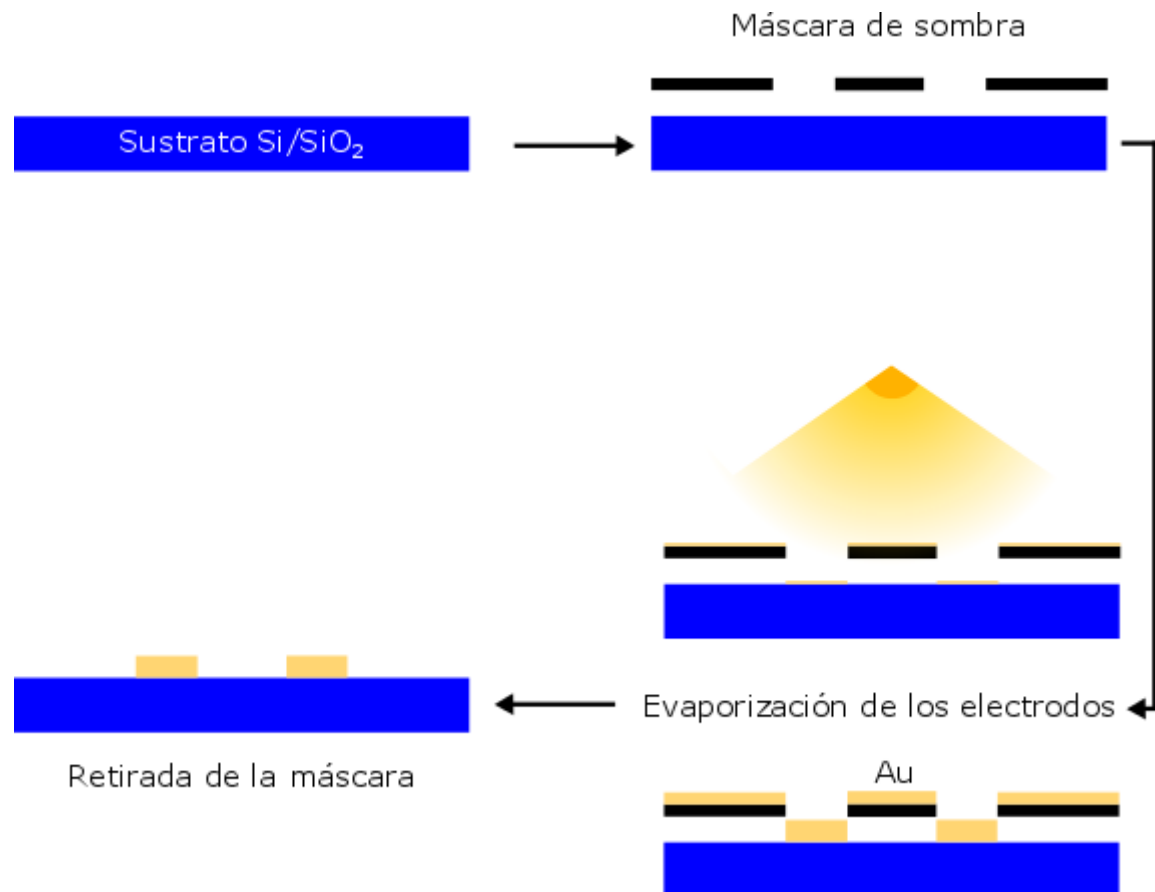
**Figura 3-2:** Foto tomada a la evaporadora térmica de la sala blanca perteneciente al Instituto IMDEA Nanociencia.

Con el objeto de fabricar electrodos bien definidos mediante la evaporación de un metal es necesario el empleo de algún tipo de máscara, ya sea metálica o basada en algún polímero, que permita la evaporación del metal sobre un sustrato sólo en las zonas deseadas, bloqueando la evaporación en el resto del sustrato<sup>[18]</sup>. En nuestro caso empleamos una máscara de sombra con una abertura con la forma que tendrán nuestros electrodos como podemos ver en la Figura 3-3.



**Figura 3-3:** Vista superior de la máscara de sombra utilizada en la fabricación de los electrodos.

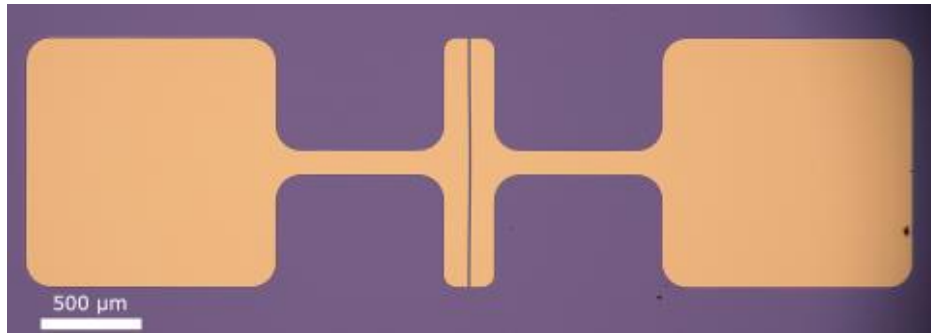
Dicha máscara se coloca encima del sustrato, sin tocar, tal como se ilustra en la Figura 3-4. Dependiendo del ángulo de evaporación que se elija, la imagen de la máscara de sombra se proyecta sobre diferentes posiciones encima del sustrato a través de las aberturas de dicha máscara. Una vez elegido el material que se va a utilizar para depositar, en este caso el oro, se evapora, pasando una parte a través de las aberturas de la máscara de sombra y otra parte se retiene encima de la máscara. Así, cuando retiremos la máscara, tendremos depositado el material encima del sustrato con la forma deseada. En la Figura 3-4 podemos encontrar el proceso completo.



**Figura 3-4:** Esquema del proceso de evaporación por máscara de sombra. Se parte de un sustrato de silicio (u óxido de silicio) al que se le dispone de unas máscaras de sombra con aberturas en función de la forma en que lo quieras depositar. A continuación se evapora una capa de oro, donde una parte queda encima de la máscara y lo que nos interesa se deposita sobre el sustrato como una película fina.

En la Figura 3-5 podemos ver el resultado final de esta técnica: los electrodos de oro han sido depositados sobre el sustrato de la forma que se pretendía.

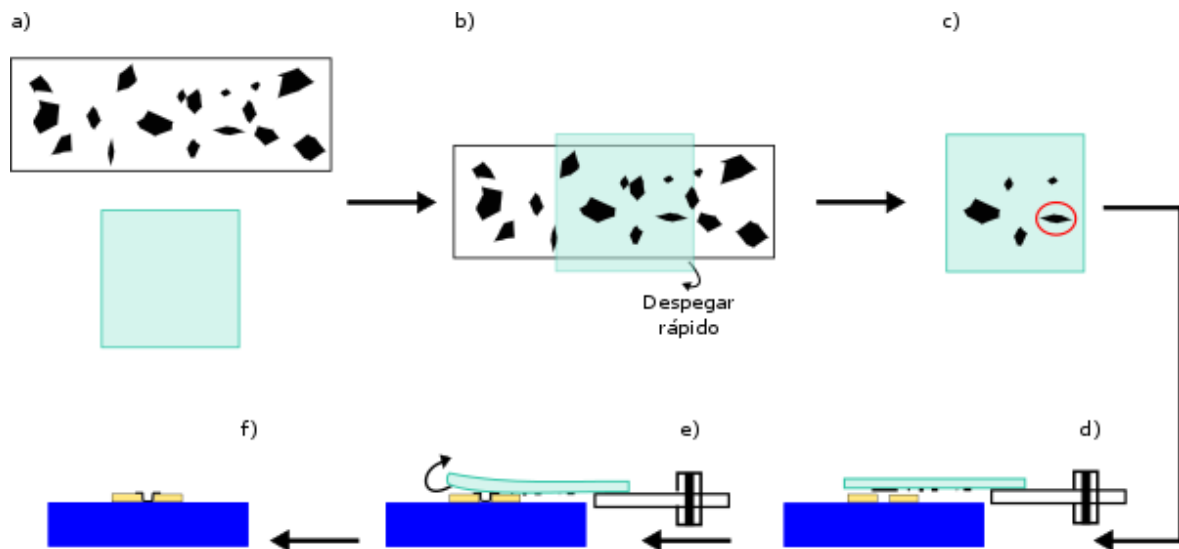




**Figura 3-5:** Imagen de los electrodos del dispositivo depositados sobre el sustrato, tomada con el microscopio óptico.

### 3.1.2 Transferencia de los semiconductores bidimensionales

El método utilizado para la transferencia de materiales bidimensionales, desarrollado recientemente, se denomina “transferencia determinista”<sup>[19]</sup>, descrito a continuación e ilustrado en la Figura 3-6, donde la parte de arriba de la figura corresponde con la parte de exfoliación y la parte de abajo a la transferencia del material bidimensional al dispositivo..



**Figura 3-6:** Esquema del proceso de transferencia de copos del material bidimensional entre los electrodos del dispositivo. Se distinguen dos procesos, el primero de exfoliación a), b) y c) en el que se exfolia el material desde una cinta adhesiva Nitto a un PDMS y posteriormente se busca un copo adecuado a través del microscopio óptico. El segundo es el de estampado, d), e) y f), en el que se procede a la transferencia del copo desde el PDMS a los electrodos del dispositivo.

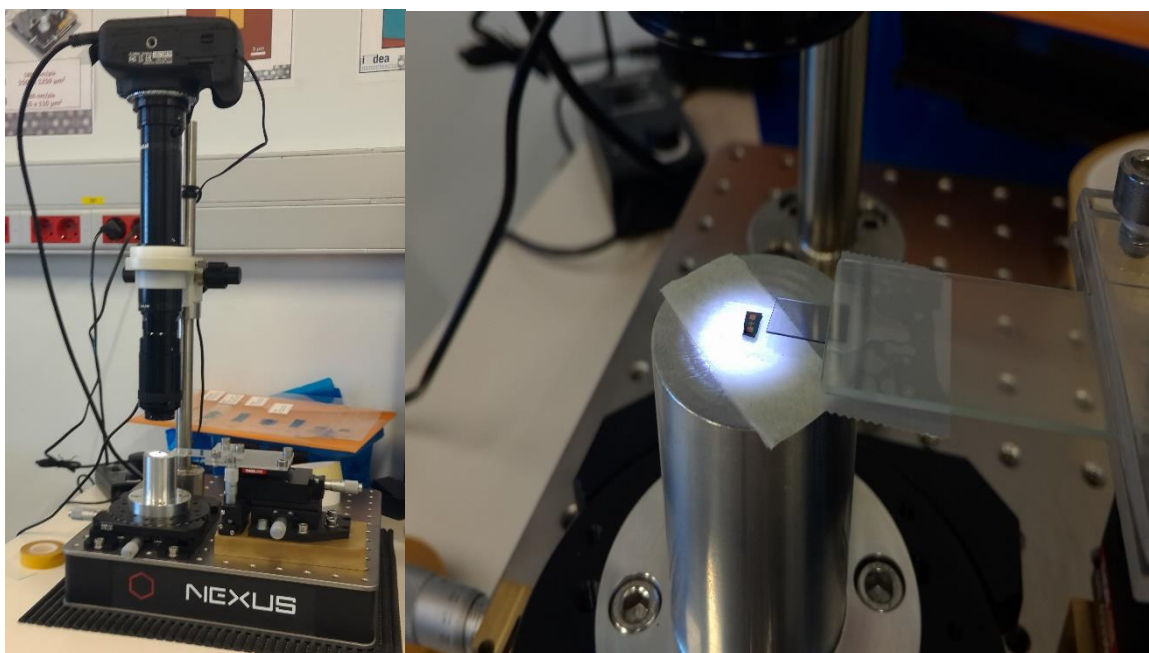
Los cristales de material bidimensional son depositados en la superficie de una cinta adhesiva (Nitto Tape SPV 224) mediante exfoliación mecánica directa del material laminado.

Una vez tenemos el material exfoliado en la cinta adhesiva hay que transferirlo a un sello de un material fino, parcialmente transparente y viscoelástico basado en un gel

polidimetilsiloxano (PDMS). Este gel está intercalado entre dos capas poliméricas protectoras. Posteriormente se remueve una de estas capas protectoras quedando el gel al descubierto. A continuación ponemos encima del gel la parte del adhesivo donde se encuentran los cristales del material bidimensional. En este punto, podemos hacer un poco de presión con un bastoncillo de algodón con el fin de evitar que queden burbujas de aire entre ambos.

El siguiente paso consiste en despegar rápidamente el PDMS del adhesivo, de manera que algunos cristales quedan adheridos al PDMS. Luego buscamos mediante un microscopio óptico (Nikon Eclipse Ci + cámara Canon EOS 1200D) copos (cristales de diversos espesores con extensión del orden de varias micras) de material lo más finos y homogéneos posible.

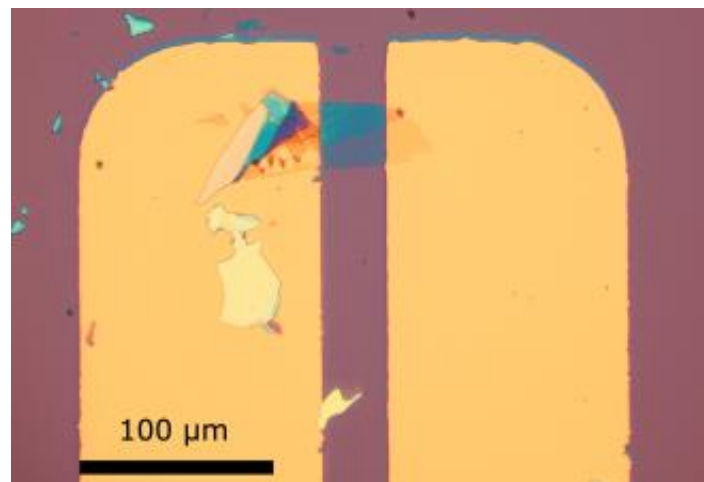
Una vez que hemos encontrado un copo adecuado, montamos el PDMS en un vidrio para poder transferirlo, con la parte del gel mirando hacia abajo. El vidrio se coloca en un manipulador XYZ y se dispone en el montaje experimental de transferencia como podemos ver en la Figura 3-7.



**Figura 3-7: Fotografía del momento del estampado de un copo sobre el dispositivo y del montaje experimental de estampado.**

El dispositivo con los electrodos está situado en una plataforma debajo de la lente del montaje experimental, que se puede rotar y mover en XY, sujeto mediante un adhesivo de doble cara. Acoplada a la lente tenemos una cámara, conectada a su vez a una pantalla, que nos permite visualizar el proceso de transferencia. Ahora habrá que enfocar en la superficie del sello de PDMS y buscar en él el copo que escogimos en el microscopio óptico. Una vez localizado el copo, iremos bajando el PDMS, por medio del manipulador, hasta encontrarnos en un punto en el que no toquemos con el dispositivo y podamos enfocar tanto el dispositivo como el copo a la vez. A continuación tenemos que alinear el copo entre los electrodos de la forma más adecuada, intentando que no queden restos de otros copos entre los electrodos. Una vez alineado copo y electrodos, bajaremos nuestro PDMS mediante el manipulador hasta que entre en contacto con el dispositivo. Detectaremos que han quedado pegados al

ver un cambio de color en el PDMS. A continuación levantamos el sello. Para ello moveremos el manipulador, retirando el sello muy lentamente. Debido a la naturaleza viscoelástica del PDMS, éste no se despegue repentinamente, sino poco a poco, de forma que podemos controlar la velocidad a la que se despegue del sustrato con una precisión mayor de  $1\mu\text{m/s}$ . Despegamos el sello hasta quedarnos cerca de la zona donde se encuentra el copo. La parte que viene a continuación es delicada, ya que hay que despegar despacio alrededor del copo para asegurarnos de que la transferencia se completará satisfactoriamente. Un pequeño truco para despegar cerca del copo es, además de despegar lentamente en Z, mover un poco el eje X de la plataforma del dispositivo para aplicar una tensión de cizalla que facilita el depósito del cristal sobre el sustrato. Podemos ver una imagen de un copo de  $\text{MoS}_2$  transferido en la Figura 3-8.



**Figura 3-8: Imagen de un copo de  $\text{MoS}_2$  transferido entre los electrodos.**

## **3.2 Caracterización**

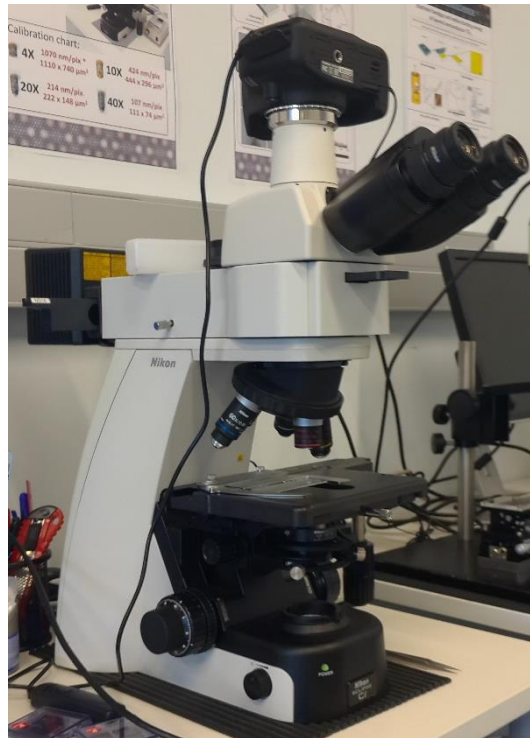
Durante la realización de este trabajo se han llevado a cabo ciertas técnicas de caracterización, como: la microscopía óptica, para buscar e identificar un copo apropiado de material bidimensional; caracterización electrónica, para la correcta realización de las medidas y comportamiento eléctrico de los dispositivos y caracterización optoelectrónica, para conocer el comportamiento de los dispositivos ante la luz.

### **3.2.1 Microscopía óptica**

Con la técnica de microscopía óptica se puede obtener una estimación del espesor de un copo del material bidimensional, basándose en el color y transparencia de éste. En la Figura 3-9 se muestra una fotografía del microscopio óptico empleado. Este microscopio puede trabajar en dos modos:

- 1) Modo transmisión: la muestra, en este caso el sello donde encontramos los diferentes copos de material bidimensional es iluminada desde abajo. Se puede estimar su espesor basándose en su transparencia óptica.

- 2) Modo reflexión: la muestra, en este caso el sello anterior se ilumina esta vez desde arriba. En este modo, la estimación del espesor se basa en el color del copo.



**Figura 3-9: Fotografía del microscopio óptico del laboratorio.**

Para la búsqueda de un copo adecuado para la transferencia usamos el modo transmisión del microscopio ya que, al ser el sello transparente, obtenemos un mejor contraste del copo y la estimación de su espesor.

### **3.2.2 Caracterización electrónica**

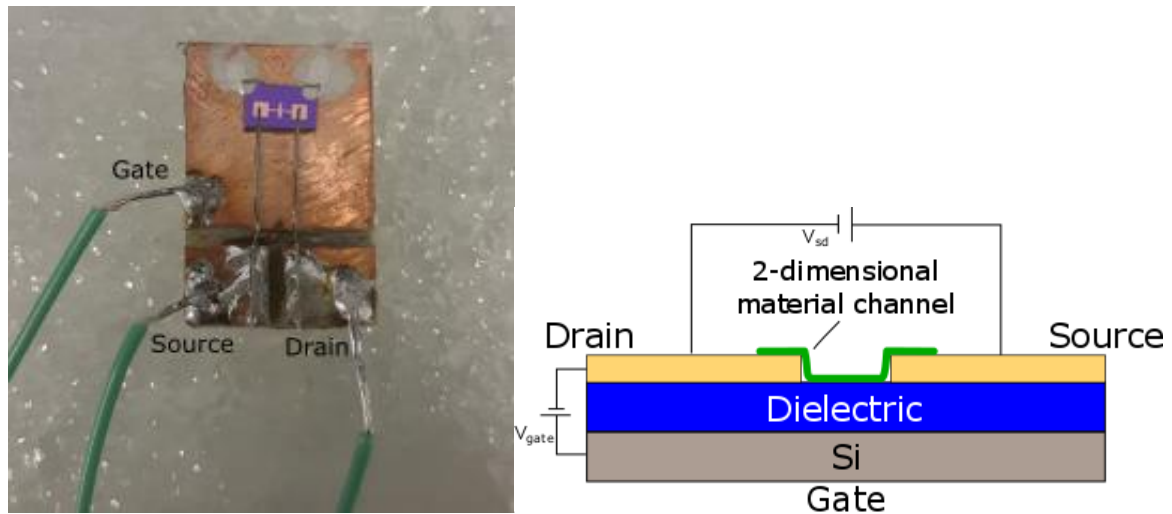
Este método es usado para saber cómo responde nuestro dispositivo caracterizado como transistor de efecto campo (FET). Lo primero que hay que fabricar es una placa de montaje, donde poder conectar en nuestro dispositivo las conexiones necesarias para poder realizar las medidas pertinentes. Esta placa de montaje es conocida como “estación de puntas” (*probe station*)<sup>6</sup>.

La estación de puntas es una pequeña placa rectangular de cobre, dividida en tres zonas diferenciadas, y que cuenta con dos flejes, que pueden ser de cobre o de otro metal, que hacen contacto con los electrodos del dispositivo. La primera zona de esta placa es donde se encuentra nuestro dispositivo, que cuenta con pintura de plata en dos de sus extremos para que haga un buen contacto con el cobre (estos dos extremos del dispositivo son rasgados con un bolígrafo de punta de diamante para asegurar el buen contacto con el sustrato). Además, de esta primera zona, se saca un cable soldado para hacer la conexión con la puerta del dispositivo. Las otras dos zonas, separadas entre ellas y de la primera, son las que unen los flejes, que hacen contacto con los electrodos, con dos cables soldados para las conexiones

---

<sup>6</sup> Se refiere a una placa de cobre con dos flejes que hacen contacto con los electrodos del dispositivo.

fuente y drenador. En la Figura 3-10 podemos ver una fotografía de una estación de puntas con una muestra montada y su forma esquemática.



**Figura 3-10: Fotografía de una estación de puntas (*probe station*) con el dispositivo unido mediante pintura de plata para un mejor contacto con la puerta del dispositivo. Se diferencian unos flejes que hacen contacto con los electrodos, dos cables soldados con cada fleje, que actuarán de fuente y drenador, y otro cable soldado al cobre que actuará de puerta. A la derecha de la figura se puede ver un esquema aproximado de las conexiones.**

Una vez tenemos la estación de puntas lista, podemos realizar las diferentes conexiones con el montaje experimental de medición.

El montaje experimental de medición cuenta con: una fuente de voltaje TENMA de 0 a 60 voltios; una unidad de medición KEITHLEY 2450; y una cámara digital con una lente de zoom, conectada a una pantalla, y que tiene un manipulador XY debajo, donde se colocan las muestras o estaciones de puntas.

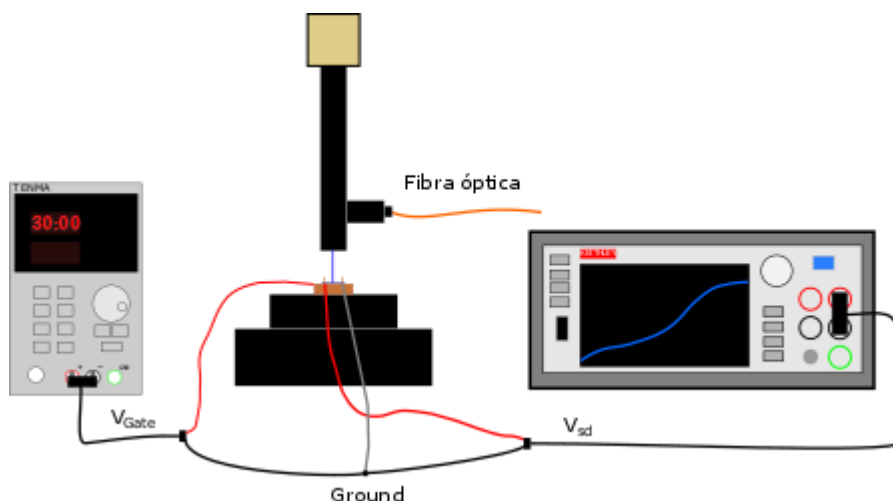
La fuente de voltaje TENMA da una corriente continua con un voltaje comprendido entre 0 y 60 Voltios. Aunque se puede manipular manualmente, a través de los botones y ruleta reguladora de los que dispone, la controlamos por ordenador para mayor comodidad. Esta fuente la utilizamos para las conexiones de voltaje de puerta, conectando el terminal positivo de la fuente al cable de puerta de la estación de puntas y el terminal negativo con el cable que actúa de drenador, ya que es el elegido para funcionar como tierra común. Las medidas de voltaje de puerta las realizamos de -30 a 30 voltios, por lo que, para conseguir el voltaje negativo, tendremos que cambiar la polaridad intercambiando las conexiones positiva y negativa.

El conjunto de cámara digital, lente de zoom y manipulador, está conectado a una pantalla donde poder ver el dispositivo. También cuenta con una entrada para luz blanca o de fibra óptica mediante un adaptador. Para las medidas en oscuridad la muestra está cubierta y no se utiliza la fibra óptica ni la luz blanca.

La unidad de medición KEITHLEY 2450 es la que realiza las medidas corriente-voltaje (*IV*) de caracterización de un FET. El terminal positivo se conecta al cable que actúa de fuente en la estación de puntas y el terminal negativo se conecta al del drenador, que estamos usando como tierra común. Con el KEITHLEY podemos realizar curvas *IV*, definiendo un

barrido de voltaje. Además, podemos realizar medidas de la corriente en función del tiempo. Al igual que la fuente de voltaje, el control puede ser manual pero lo realizamos mediante ordenador ya que resulta más cómodo y rápido.

En la Figura 3-11 se puede ver un esquema del montaje experimental de medición con lo mencionado anteriormente.



**Figura 3-11: Esquema del montaje experimental de medición y conexiones eléctricas. De la fuente de voltaje TENMA sacamos el  $V_{gate}$  y del dispositivo KEITHLEY sacamos el  $V_{sd}$ . Tanto el negativo del TENMA como del KEITHLEY se conectan al drenador del dispositivo, lo que será la tierra común. El positivo del TENMA se conecta a la puerta del dispositivo y el positivo del KEITHLEY se conecta a la fuente del dispositivo. La fibra óptica se conecta al LED de longitud de onda deseada y a la lente de zoom del montaje experimental.**

### 3.2.3 Caracterización optoelectrónica

A la hora de realizar medidas con luz, el montaje experimental de medición sigue siendo el mismo aunque entran en juego otros dispositivos como la mesa de diodos emisores de luz (LEDs, por sus siglas en inglés), un generador de señales YOKOGAWA y un medidor de potencia THORLABS.

El conjunto de LEDs utilizados es el que podemos ver en la Figura 3-12, que comprende las siguientes longitudes de onda: 375 nm, 405 nm, 455 nm, 505 nm, 617 nm, 660 nm, 850 nm y 1050 nm. Cada LED dispone de su regulador de potencia a través de una ruleta. Cada LED dispone además de una entrada coaxial a la que podemos conectar el generador de señales para modular la intensidad de los LED a una cierta frecuencia y con una señal de forma arbitraria, elegida por el usuario. Además disponemos de un láser de 1550 nm, diferente a los que se ven en la Figura 3-12 y que no se puede regular con el generador de señales. Cada LED tiene un conector para la fibra óptica, cuyo otro extremo se conecta al montaje experimental. A través de la pantalla podremos enfocar el spot de la fibra óptica justo encima del copo. También disponemos de diferentes fibras ópticas con diferente diámetro de haz (spot en adelante) que se tendrá en cuenta para la realización de cálculos posteriores.





**Figura 3-12: Fotografía de la mesa de LEDs de potencia, ordenados por su longitud de onda en nm: 375, 405, 455, 505, 617, 660, 850 y 1050.**

La generación de señales se realizó con el generador de señales YOKOGAWA que se encuentra en la fotografía de la izquierda de la Figura 3-13. Con este generador de señales podemos marcar la frecuencia, la forma y la potencia que queremos de señal (esta potencia la marca el voltaje pico a pico que luego relacionamos con la potencia de real en vatios).



**Figura 3-13: Modulador de señales YOKOGAWA y medidor de potencias THORLABS con sensor para diferentes longitudes de onda.**

Así mismo, encontramos en la fotografía de la derecha de la Figura 3-13 un medidor de potencias THORLABS y su sensor, con el que se mide la potencia del LED resultante tras su paso a través de la lente de zoom del montaje experimental. Este medidor se configura indicando la longitud de onda que vamos a medir y fijando en oscuridad el cero de la medida. El sensor del que dispone es intercambiable, ya que cada sensor cubre una franja de longitudes de onda determinada, por lo que utilizaremos el que más nos convenga.



## 4 Desarrollo

---

Al comienzo de este proyecto se ha utilizado como material bidimensional el disulfuro de molibdeno ( $\text{MoS}_2$ ) ya que es un material bien conocido y estudiado, por lo que resulta adecuado para probar que el desarrollo y los resultados son correctos, así como probar que los montajes experimentales funcionan correctamente.

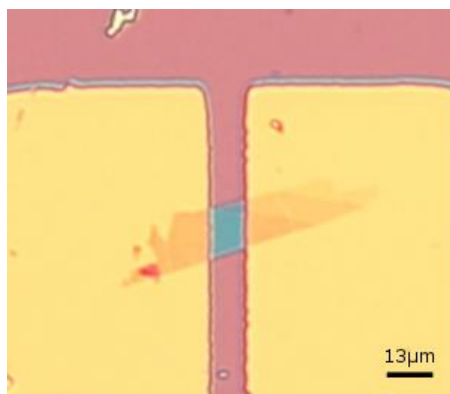
### 4.1 Fabricación de fototransistores de $\text{MoS}_2$

Lo primero que debemos hacer es fabricar nuestro fototransistor de material semiconductor bidimensional, partiendo de un sustrato con los electrodos prefabricados cortado de una oblea de silicio con una matriz de pares de electrodos. Este corte se realiza haciendo un araño con el bolígrafo de punta de diamante en el borde de la oblea paralelo a su dirección de corte, y haciendo presión por el lado contrario.

En la Figura 3-5 de apartados anteriores, podemos observar los electrodos de nuestro dispositivo limpio por el momento, al que después le transferiremos el copo de  $\text{MoS}_2$  entre los electrodos

Una vez que tenemos nuestro dispositivo cortado, procedemos a la transferencia de un copo de  $\text{MoS}_2$ . La transferencia del copo se realiza de la forma vista anteriormente en la subsección 3.1.2.

En la Figura 4-1 nos encontramos con dicho copo ya transferido, en esta ocasión en uno de los extremos entre ambos electrodos.

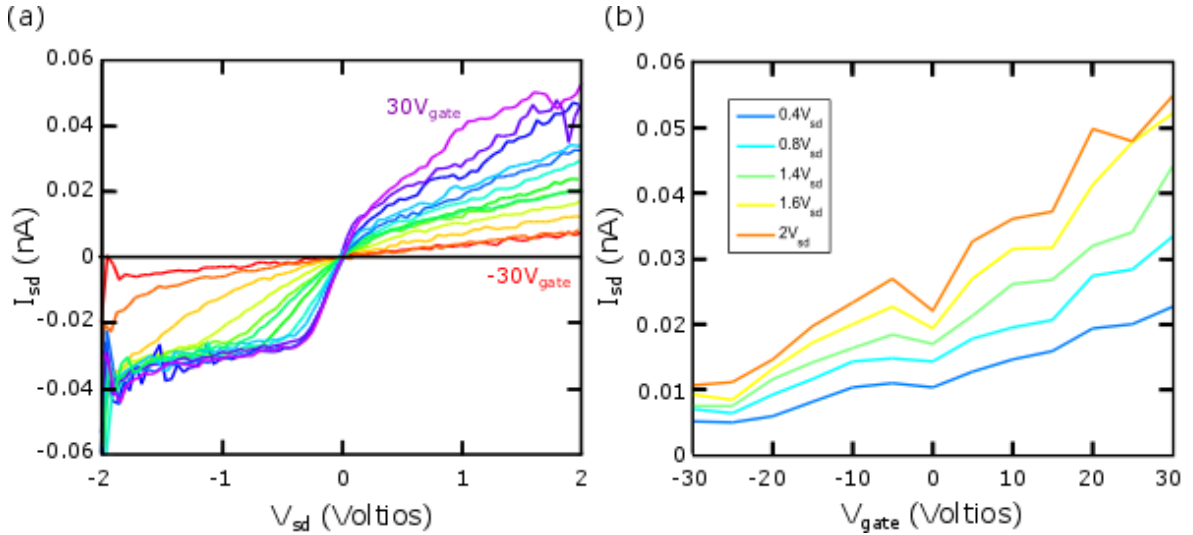


**Figura 4-1: Copo tricapa de  $\text{MoS}_2$  de  $12.86\ \mu\text{m}$  x  $17.98\ \mu\text{m}$  transferido entre los dos electrodos fuente y drenador del dispositivo.**

## 4.2 Caracterización eléctrica de fototransistores de MoS<sub>2</sub>

Cuando ya tenemos el copo de material bidimensional transferido entre los electrodos del dispositivo, y éste montado en una estación de puntas como la vista en la subsección 3.2.2, se procede a realizar las medidas de caracterización de un FET.

La primera medida que se realiza es una curva corriente-voltaje ( $I_{sd} - V_{sd}$ ) para distintos voltajes de puerta fijos ( $V_{gate}$ ) y después podemos extraer de esta medida una curva  $I_{sd} - V_{gate}$  para diferentes  $V_{sd}$ . Ambas gráficas se muestran en la Figura 4-2.



**Figura 4-2:** (a) Gráfica de Intensidad fuente-drenador,  $I_{sd}$ , frente al voltaje fuente-drenador  $V_{sd}$ , para diferentes voltajes de puerta,  $V_{gate}$ . El barrido en voltaje se ha hecho de -2 a 2 V para cada  $V_{gate}$  comprendido en el rango de -30 a 30 V en pasos de 5 V. (b) Gráfica de  $I_{sd}$  frente a  $V_{gate}$ , para distintos valores de  $V_{sd}$ .

A partir de la gráfica que encontramos en la Figura 4-2 (b), podemos calcular la movilidad<sup>7</sup> de efecto campo de este dispositivo usando la expresión:

$$\mu = \frac{dI_{sd}}{dV_{sd}} \times \frac{L}{WC_{ox}V_{sd}} \left[ \frac{m^2}{V * s} \right] \quad (1)$$

donde  $L$  es la longitud del canal (que será igual a la separación entre electrodos),  $W$  es el ancho del canal (el ancho del copo),  $V_{sd}$  el máximo voltaje fuente-drenador en la región lineal y  $C_{ox}$  es la capacidad eléctrica por unidad de área entre la puerta y el canal<sup>[9]</sup>, definida como

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{d}; \quad \epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}; \quad \epsilon_r = 3.9; \quad d = 285 \text{ nm} \quad (2)$$

<sup>7</sup> La movilidad de los electrones caracteriza la rapidez con que un electrón puede moverse a través de un metal o semiconductor, movido por un campo eléctrico.

donde  $\epsilon_0$  es la permitividad del vacío,  $\epsilon_r$  la permitividad relativa del SiO<sub>2</sub> y  $d$  el espesor del SiO<sub>2</sub>. La derivada que aparece en (1) corresponde a la pendiente de la curva de la Figura 4-2 (b) (curva correspondiente al voltaje elegido en la ecuación), que podemos calcular a partir de una aproximación lineal de tres o más puntos. Un buen dispositivo debería tener una movilidad alta. Aunque en el sistema internacional (SI) las unidades de la movilidad sean en  $\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  es más común usar  $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ .

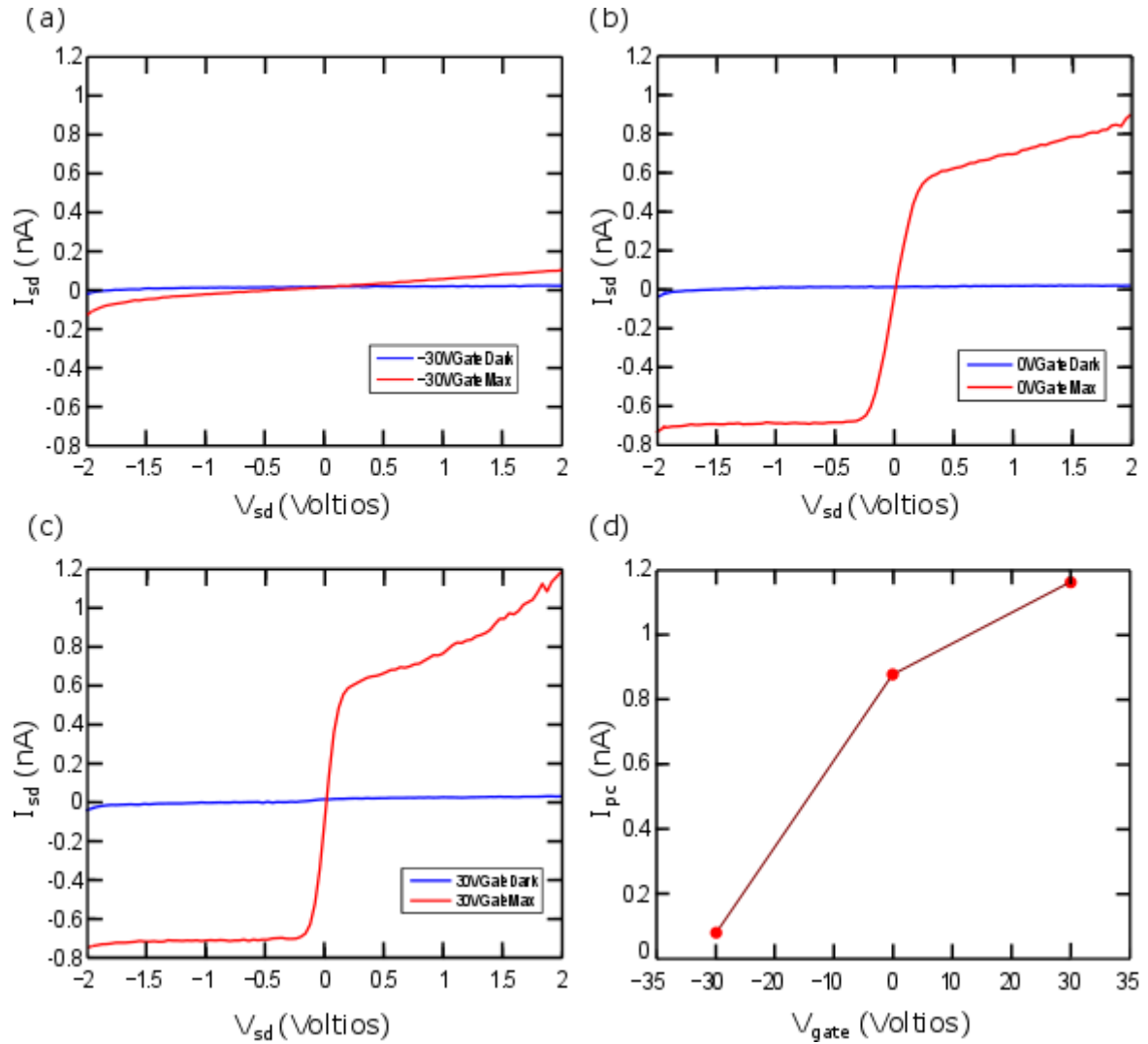
Para nuestro dispositivo obtenemos una movilidad  $\mu = 1.9 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ . En comparación con resultados de algunos artículos, la movilidad de una monocapa de MoS<sub>2</sub> es de  $0.11 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ <sup>[20]</sup>. Esta mejora en la movilidad se consigue con el tratamiento de los dispositivos para reducir la presencia de adsorbatos atmosféricos y mediante la medición en alto vacío, lo que va más allá del ámbito de este proyecto.

### **4.3 Caracterización optoelectrónica de fototransistores de MoS<sub>2</sub>**

Después de haber hecho la caracterización eléctrica de nuestro fototransistor, procedemos a estudiar sus características y respuesta ante la luz.

Las primeras medidas que se realizan son, como en el apartado anterior, unas curvas  $I_{sd} - V_{sd}$  pero esta vez solo en función de tres valores de  $V_{gate}$ , -30 V, 0 V y 30 V. Además, para cada una de las curvas anteriores, se realiza una medida en oscuridad y otra con exposición al LED de 455 nm a máxima potencia.

Una vez que tenemos las medidas anteriores, mostradas en la Figura 4-3 (a), (b) y (c), podemos comparar los resultados obteniendo, de cada una, la fotocorriente, que se define como  $I_{ph} = I_{sd-iluminado} - I_{sd-oscuridad}$ . Esta comparación se muestra en la Figura 4-3 (d), donde se puede observar que la mayor fotocorriente se obtiene a  $V_{gate} = 30 \text{ V}$  e iluminado.



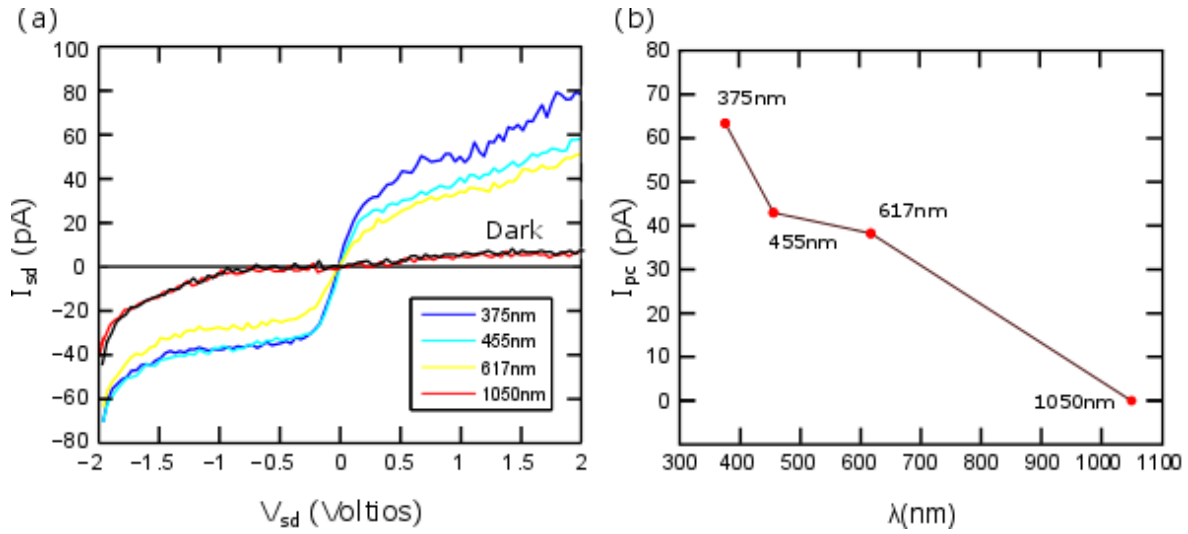
**Figura 4-3:** (a) Gráfica que muestra la respuesta de la muestra en oscuridad y a máxima potencia para un LED de 455 nm cuando  $V_{gate}$  vale -30 V. Podemos ver que para voltajes muy negativos la respuesta a máxima potencia es casi la misma que en oscuridad. (b) Gráfica que muestra la respuesta de la muestra en oscuridad y a máxima potencia cuando  $V_{gate}$  vale 0 V. La muestra ya reacciona bastante mejor ante la luz. (c) Gráfica que muestra la respuesta de la muestra en oscuridad y a máxima potencia cuando  $V_{gate}$  vale +30 V. Notamos un cierto aumento en la respuesta respecto al de 0 V. (d) Gráfica de la fotocorriente ( $I_{sd}$ -máxima-potencia -  $I_{sd}$ -oscuridad) en función del  $V_{gate}$ .

#### 4.3.1 Dependencia con la longitud de onda

Ahora que ya se ha comprobado cómo nuestro fototransistor funciona, es decir, reacciona ante la luz, pasamos a estudiar cómo varía esta respuesta en función de la longitud de onda del LED que se le aplique a la hora de realizar las medidas.

Volvemos a medir una curva  $I_{sd} - V_{sd}$ , pero esta vez con el voltaje de puerta fijo y para distintas longitudes de onda: 375 nm, 455 nm, 617 nm y 1050 nm. Cuando tengamos estas

curvas, podemos compararlas como en el caso anterior, con la fotocorriente. Estas dos gráficas se muestran en la Figura 4-4.



**Figura 4-4: (a) Gráfica de curvas características  $I_{sd}$  -  $V_{sd}$  para cada longitud de onda a una potencia de 100 nW, además de la curva en oscuridad. (b) Gráfica de fotocorriente (resta del valor de la corriente para 100 nW y en oscuridad, ambos valores en el punto de 2  $V_{sd}$ ) para cada una de las longitudes de onda a una potencia de 100 nW.**

Nuestro fotodetector presenta fotorrespuesta para las longitudes de onda 375 nm, 455 nm y 617 nm, obteniendo de más a menos fotocorriente en este orden. Por otro lado, para 1050 nm, nuestro fotodetector no reacciona por lo que no trabajará a esta longitud de onda, comportándose igual que en oscuridad.

Ahora podemos calcular la responsividad<sup>8</sup> para las diferentes longitudes de onda. Este cálculo lo realizamos para otro dispositivo de  $\text{MoS}_2$ , ya que se disponía de más longitudes de onda y los resultados son comparables, dato que se ha comprobado al haber realizado estas mismas medidas para varios dispositivos de  $\text{MoS}_2$ .

La responsividad la podemos calcular con esta fórmula:

$$R = \frac{I_{sd-\text{iluminado}} - I_{sd-\text{oscuridad}}}{P_{eff}} \text{ [A/W]} \quad (3)$$

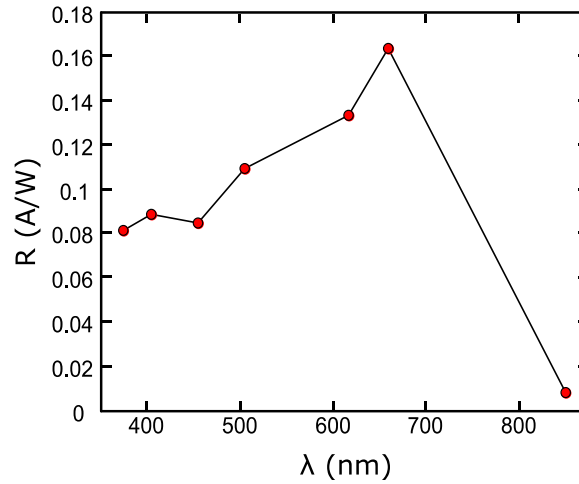
En esta ecuación, el numerador es la fotocorriente que se obtiene y  $P_{eff}$  es la potencia efectiva obtenida mediante la expresión:

$$P_{eff} = P_{in} \times \frac{A_{device}}{A_{spot}} \quad (4)$$

<sup>8</sup> La responsividad es la relación entre la señal de salida, fotocorriente, y la señal de entrada, potencia efectiva del LED.

donde  $P_{in}$  es la potencia del láser,  $A_{device}$  es el área del dispositivo y  $A_{spot}$  es el área del spot (depende de la fibra óptica que se utilice). La responsividad se mide en  $[A/W]$ .

En la Figura 4-5 podemos ver la gráfica de responsividad para distintas longitudes de onda, que en este caso son: 375 nm, 405 nm, 455 nm, 505 nm, 617 nm, 660 nm y 850 nm. La longitud de onda de 1050 nm la omitimos de esta medida ya que, como hemos visto anteriormente, no produce ninguna respuesta. Los valores numéricos los podemos encontrar en la Tabla 4-1. Estas medidas se han realizado para una misma potencia de  $1\mu W$  para todas las longitudes de onda ( $\lambda$ ).



**Figura 4-5: Gráfica de la responsividad frente a la longitud de onda para otro dispositivo de MoS<sub>2</sub> medido de características similares.**

$\lambda$ (nm)	375	405	455	505	617	660	850
R (A/W)	0.0816	0.0884	0.0848	0.1093	0.1332	0.1636	0.0080

**Tabla 4-1: Valores numéricos de la responsividad frente a la longitud de onda, correspondientes a la Figura 4-5**

Como se ve en la gráfica de la Figura 4-5, obtenemos un pico de mayor responsividad a 660 nm y casi cero para 850 nm. De estos resultados podemos deducir que el MoS<sub>2</sub> no es capaz de trabajar en la banda de telecomunicaciones ya que apenas llega a 850 nm.

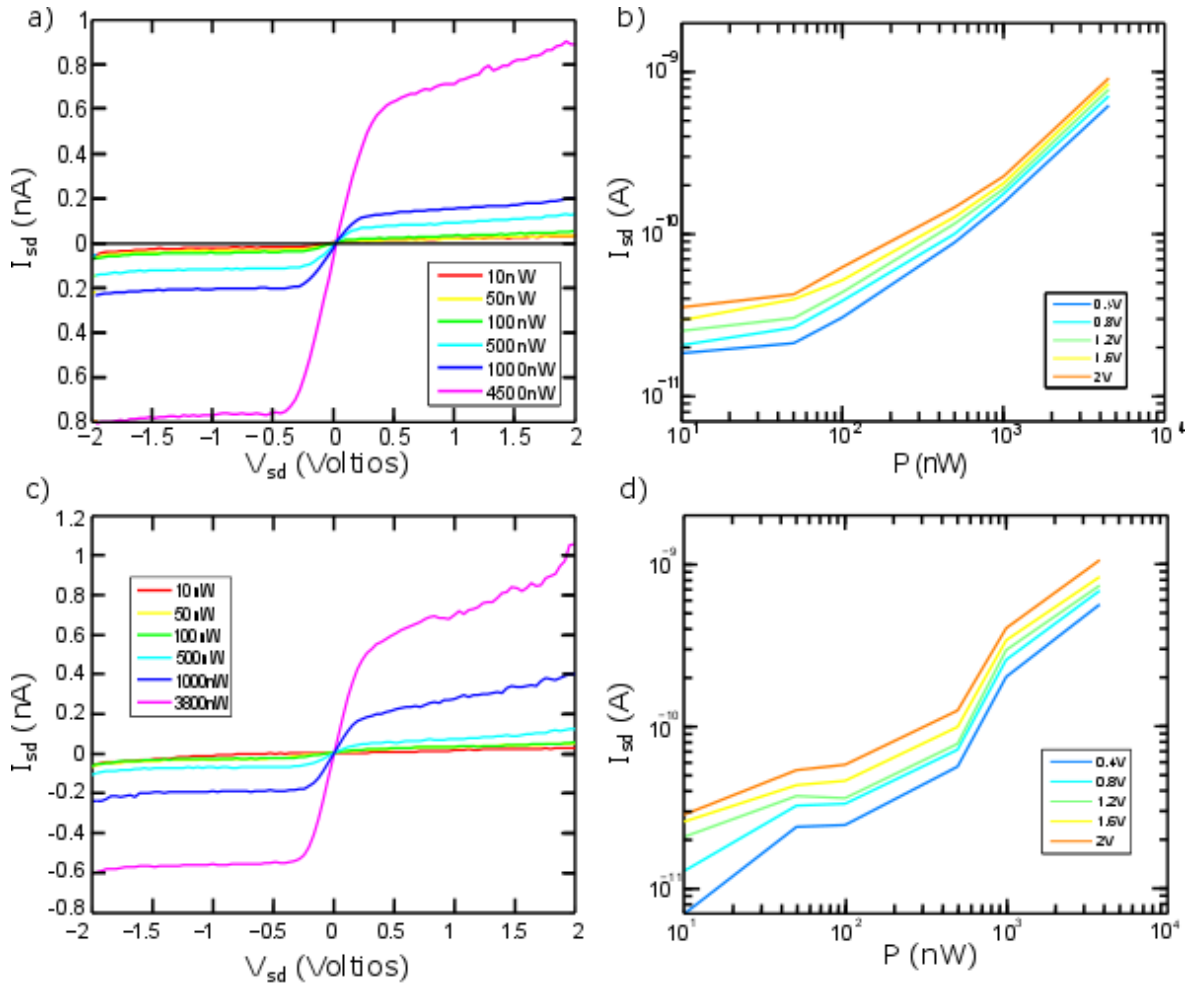
Un resultado sacado de la literatura para la responsividad del MoS<sub>2</sub> es  $0.2 \text{ mA/W}^{[20]}$ , que no dista demasiado de los resultados que hemos obtenido.

### 4.3.2 Dependencia con la potencia

Ahora que hemos visto cómo responde nuestro dispositivo a diferentes longitudes de onda, procedemos a ver la respuesta en función de la potencia del LED que le apliquemos a una determinada longitud de onda.

Volvemos a realizar las curvas características  $I_{sd} - V_{sd}$ , para un voltaje de puerta fijo y variando ahora las potencias de manera logarítmica. En la Figura 4-6 podemos ver las

gráficas  $I_{sd} - V_{sd}$  obtenidas para a) 455 nm y para c) 617 nm. Además, en b) y c), tenemos las gráficas  $I_{sd} - P$ , en escala logarítmica, para las dos longitudes de onda anteriormente nombradas.

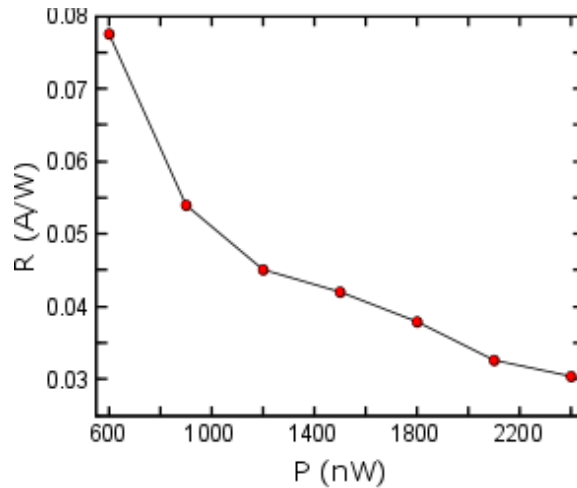


**Figura 4-6:** a) Curvas de la respuesta de la muestra a 455 nm y c) a 617 nm a diferentes potencias de LED. b) Gráfica de  $I_{sd}$  frente a la potencia del LED para 475 nm, en escala logarítmica. La respuesta mejora bastante en función de la potencia del LED. d) Gráfica de  $I_{sd}$  frente a la potencia del LED para 617 nm, en escala logarítmica. Vemos que la respuesta aun mejora en función de la potencia del LED.

La conclusión que sacamos de estas gráficas es que, según aumentamos la potencia del LED, la respuesta del dispositivo también aumenta. En las gráficas frente a la potencia se puede distinguir para qué potencias la respuesta se incrementa.

Al igual que en la subsección anterior, ahora realizamos los cálculos de la responsividad para otro dispositivo.

En la Figura 4-7 tenemos la gráfica de responsividad frente a las distintas potencias de LED elegidas (600 nW, 900 nW, 1200 nW, 1500 nW, 1800 nW, 2100 nW y 2400 nW) para 455 nm. Los valores numéricos de estas responsividades se muestran en la Tabla 4-2.



**Figura 4-7: Gráfica de la responsividad frente a la potencia del LED de 455 nm para otro dispositivo de  $\text{MoS}_2$  medido de características similares.**

P (nW)	600	900	1200	1500	1800	2100	2400
R (A/W)	0.0776	0.054	0.0451	0.042	0.0379	0.0326	0.0304

**Tabla 4-2: Valores numéricos de la responsividad frente a la potencia del LED, correspondientes a la Figura 4-7**

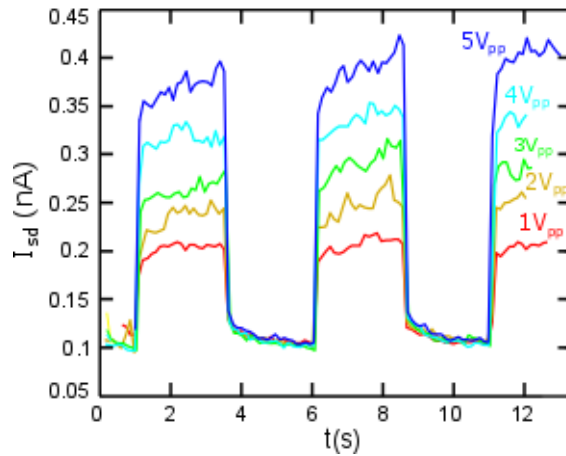
Como podemos ver, la responsividad va disminuyendo mientras que la potencia aumenta. Este resultado se debe a que, al aumentar la potencia, se generan más portadores de carga lo que lleva a un aumento de la probabilidad de recombinación de los pares electrón-hueco y, por lo tanto, se produce una pérdida de eficiencia durante el proceso.

### 4.3.3 Respuesta temporal

Por último realizamos una caracterización temporal de nuestro dispositivo. Esta caracterización se hace a partir de un generador de señales YOKOGAWA, descrito anteriormente. Con este generador de señales podemos asignar el tipo de señal que vamos a usar, en este caso una señal cuadrada; el porcentaje de periodo que tendremos la señal en el estado On y Off, le asignamos un 50%; y un voltaje pico a pico que será lo que defina la potencia que entrega el LED.

La respuesta temporal obtenida tiene la forma que podemos ver en la Figura 4-8, donde encontramos las diferentes curvas descritas en el párrafo anterior para distintos voltajes pico a pico.





**Figura 4-8:** Curva  $I_{sd}$  frente al tiempo ante una onda cuadrada con el 50% del tiempo en ON (LED encendido) y el 50% en off (LED apagado), para distintos valores pico a pico de la onda, teniendo el máximo soportado en 5 V. El LED utilizado fue el de 455 nm.

En esta última gráfica podemos apreciar que nuestro fotodetector responde bastante bien ante los cambios de una señal luminosa, ya que la respuesta ante el cambio On-Off y Off-On es bastante rápida y se distingue con claridad ambos estados.

Puesto que el generador de señales aplica una potencia a través del voltaje pico a pico que se aplica, se ha determinado la potencia que le corresponde a cada valor de voltaje pico a pico utilizado. Esta correspondencia voltaje-potencia la podemos encontrar en la Tabla 4-3. Para determinar la potencia que aplica cada voltaje, se ha utilizado el medidor de potencias que se describe en subsecciones anteriores.

Vpp (V)	1	2	3	4	5
P (μW)	1.12	2.15	3.1	3.9	4.6

**Tabla 4-3:** Correspondencia entre los valores de voltaje pico a pico de la señal LED modulada en la Figura 4-8 con su potencia correspondiente.

## 5 Resultados

---

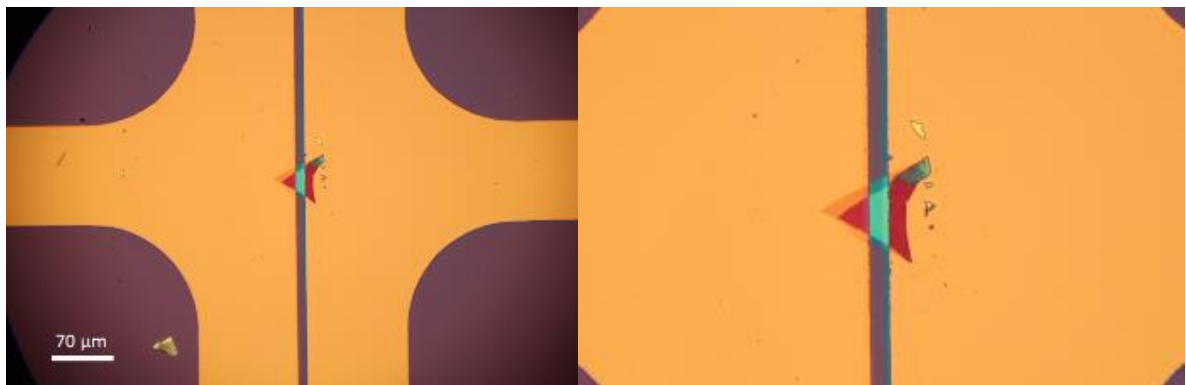
Llegados a este punto podemos afirmar que los montajes experimentales funcionan correctamente y que todo el proceso de caracterización de la muestra arroja datos y resultados que encajan con estudios previos.

Ahora pasamos a caracterizar el fósforo negro, un material aislado recientemente y que debería responder favorablemente en la banda de infrarrojo cercano.

### 5.1 Fabricación de fototransistores de Fósforo negro

Como ya hicimos con el  $\text{MoS}_2$ , el primer paso que debemos seguir es la fabricación del fotodetector con fósforo negro. El método seguido es exactamente el mismo: exfoliar el material, buscar un copo adecuado y transferirlo entre los electrodos del dispositivo.

Esta vez el copo de fósforo negro elegido es transferido en el centro del dispositivo entre ambos electrodos como se muestra en la Figura 5-1.

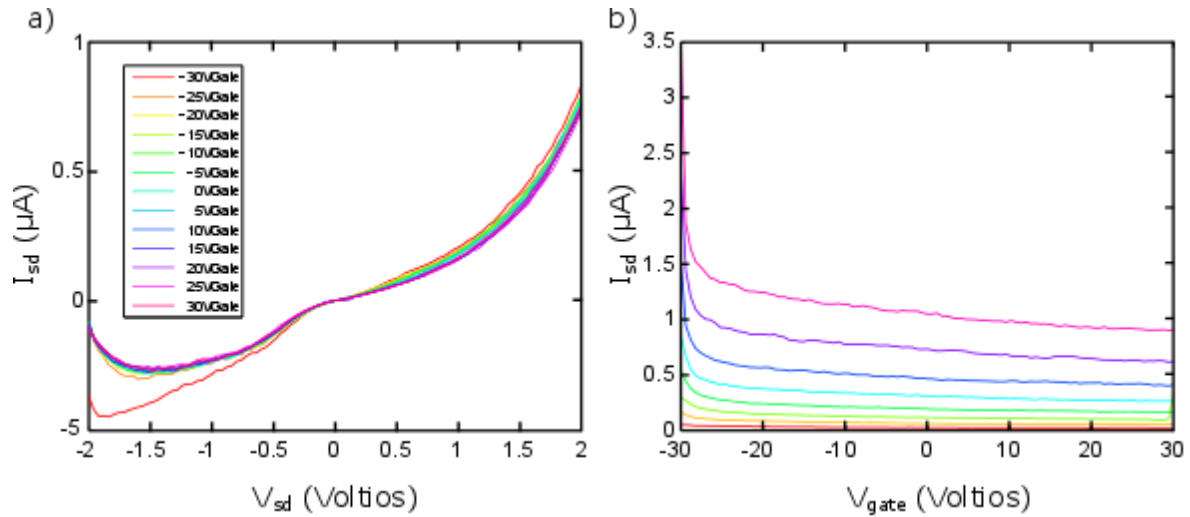


**Figura 5-1:** Copo de fósforo negro de dimensión  $10\ \mu\text{m} \times 38.5\ \mu\text{m}$  y de varias capas de espesor transferido entre los electrodos del dispositivo. Distancia entre electrodos  $10\ \mu\text{m}$ .

### 5.2 Caracterización eléctrica de fototransistores de Fósforo negro

Una vez hemos transferido el copo de fósforo negro entre los electrodos, podemos montarlo en una estación de puntas y proceder a su medición para obtener sus características eléctricas.

Lo primero que medimos son las curvas características  $I_{\text{sd}} - V_{\text{sd}}$  para distintos  $V_{\text{gate}}$  y, después, realizamos las curvas  $I_{\text{sd}} - V_{\text{gate}}$  para diferentes  $V_{\text{sd}}$ . Ambas gráficas las podemos encontrar en la Figura 5-2, medidas con el dispositivo en oscuridad.



**Figura 5-2:** a) Gráfica de  $I_{sd}$  frente a  $V_{sd}$ , para diferentes  $V_{gate}$ . El barrido en voltaje se ha hecho de -2 a 2 V para cada  $V_{gate}$  comprendido en el rango de -30 V a 30 V en pasos de 5 V. b) Gráfica de  $I_{sd}$  frente a  $V_{gate}$ , para distintos valores de  $V_{sd}$ . En esta gráfica podemos ver que el material está dopado tipo P ya que a voltajes menores conduce más.

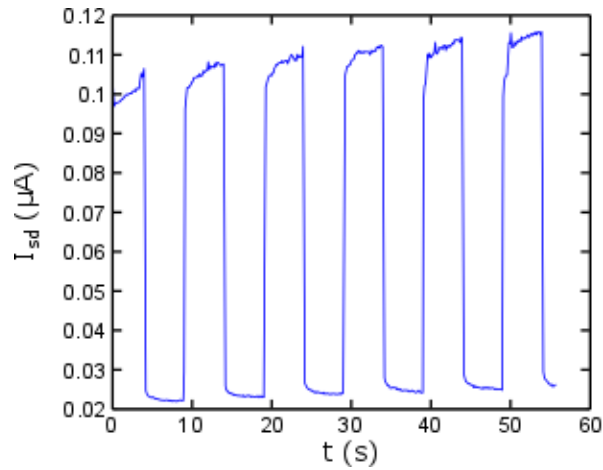
Al ver estas gráficas podemos apreciar notables diferencias con el MoS<sub>2</sub> como que conduce una corriente más alta, la curva no satura para los mismos valores de  $V_{sd}$ , y que este material es tipo P ya que, a mayor voltaje de puerta, menor corriente conduce.

Usando la misma fórmula que para el MoS<sub>2</sub>, podemos obtener la movilidad para este dispositivo. Para ello utilizamos la gráfica de la Figura 5-2 b), teniendo especial cuidado a la hora de elegir los puntos para el cálculo de la pendiente ya que muestra un comportamiento capacitivo al comienzo de la curva. Escogemos los puntos entre  $V_{gate} = -27$  V y  $V_{gate} = -17$  V para este cálculo.

Para este dispositivo de fósforo negro obtenemos una movilidad  $\mu = 0.2152 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ , cuatro órdenes de magnitud mayor que el que obtuvimos para el MoS<sub>2</sub>. Si lo comparamos con otros dispositivos de fósforo negro de la literatura,  $\mu = 0.5 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ <sup>[21]</sup>, este valor es bastante próximo incluso a pesar de haber medido el dispositivo a temperatura y presión ambiente.

### 5.3 Caracterización optoelectrónica de fototransistores de Fósforo negro

Para la caracterización optoelectrónica de este dispositivo hemos simplificado la prueba, ya que nos dimos cuenta de que no hacía falta repetir todas las medidas, sino que con menos era suficiente para obtener los mismos resultados. Por esto, realizamos en este caso una respuesta temporal en la que podemos ver el estado en oscuridad y el estado de iluminación, esta vez solamente para un único voltaje de puerta. Esta gráfica podemos encontrarla en la Figura 5-3 y de la que se puede obtener que la fotocorriente es, aproximadamente, de unos 84 nA.

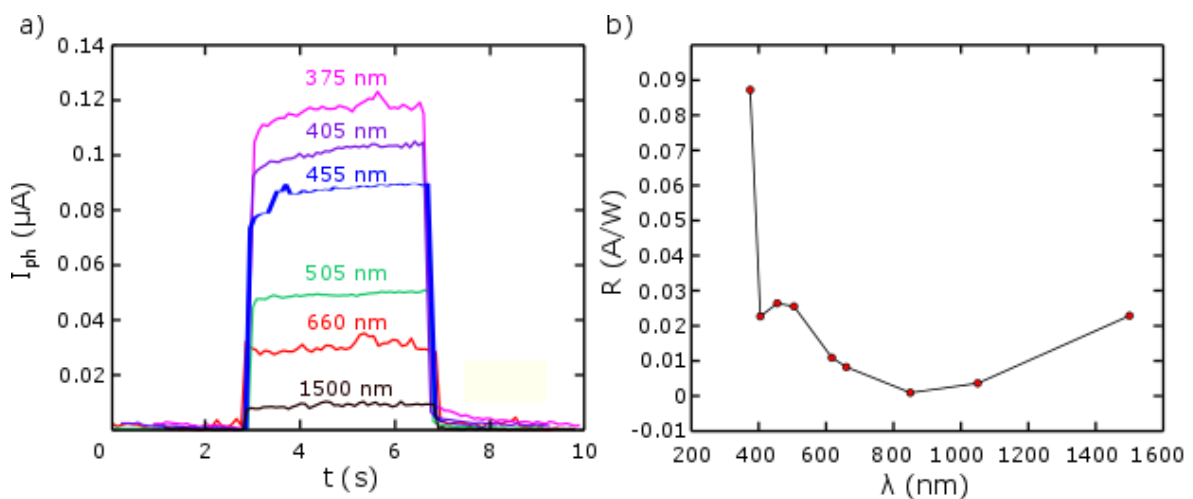


**Figura 5-3: Gráfica de  $I_{sd}$  frente al tiempo en la que se distinguen las fases On y Off de respuesta frente a la luz, en este caso al LED de 455 nm.**

Si comparamos la fotocorriente con la obtenida en el caso del  $\text{MoS}_2$ , para mismas condiciones de longitud de onda de 455 nm,  $V_{\text{gate}} = 0$  V y potencia de LED entregada por el generador de señales de 5 Vpp, vemos que para el fósforo negro es considerablemente mayor.

### 5.3.1 Dependencia con la longitud de onda

Para ver la dependencia con la longitud de onda también hemos cambiado el método para realizar la prueba, simplificando así las medidas. Esta vez obtenemos la fotocorriente en función del tiempo, lo que nos permite distinguir en una sola gráfica la respuesta que tiene para cada longitud de onda. Esta gráfica la podemos encontrar en la Figura 5-4 a), en la que hemos omitido algunas longitudes de onda ya que su fotocorriente se aproximaba a cero en la escala utilizada y no es posible distinguirlas.



**Figura 5-4: a) Gráfica de fotocorriente (corriente iluminado – corriente en oscuridad) frente al tiempo para varias longitudes de onda. b) Gráfica de responsividad frente a la longitud de onda.**

Al igual que en el caso del MoS<sub>2</sub> calculamos la responsividad utilizando la misma fórmula. En la Figura 5-4 b) podemos ver la gráfica de la responsividad en función de la longitud de onda. Se puede observar que el máximo lo tiene en 375 nm, que en longitudes de onda como 660 nm, 850 nm y 1050 nm obtenemos valores muy bajos y que nuestro dispositivo responde a una longitud de onda de 1550 nm. Esto quiere decir que hemos logrado fabricar un fotodetector en la banda de infrarrojos cercana.

Los valores numéricos de responsividad para cada longitud de onda los encontramos en la Tabla 5-1.

$\lambda$ (nm)	375	405	455	505	617	660	850	1050	1550
R (A/W)	0.0876	0.0227	0.0262	0.0256	0.0113	0.008	0.0009	0.0037	0.0235

**Tabla 5-1: Valores numéricos de la responsividad frente a la longitud de onda, correspondientes a la Figura 5-4 b).**

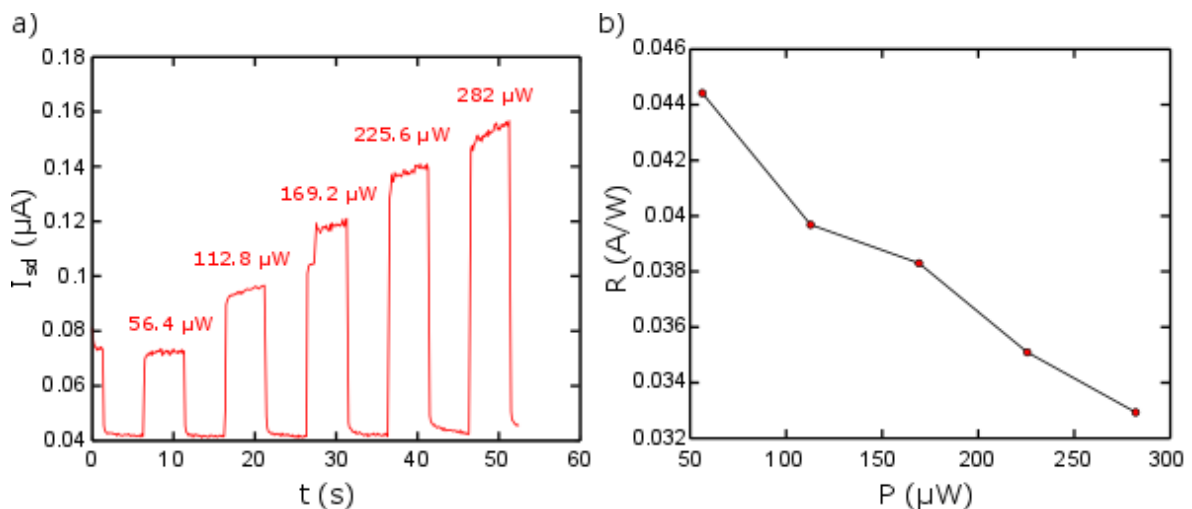
En otros proyectos podemos ver valores de responsividad para el fósforo negro de 4.8 mA/W<sup>[21]</sup>, un valor que no se aleja mucho de los resultados aquí obtenidos.

### 5.3.2 Dependencia con la potencia y respuesta temporal

En esta subsección vamos a ver al mismo tiempo la dependencia con la potencia de nuestro dispositivo y su respuesta temporal.

Para esta prueba volvemos a hacer uso del generador de señales, con las mismas especificaciones que usamos en la prueba del MoS<sub>2</sub>. En este caso, la equivalencia entre los valores pico a pico de la señal y su potencia correspondiente se ha hecho simultáneamente.

En la Figura 5-5 a) encontramos la gráfica de la respuesta temporal para distintas potencias del LED de 455 nm de longitud de onda, esto es, para distintos valores de voltaje pico a pico.



**Figura 5-5: a) Gráfica de  $I_{sd}$  frente al tiempo en el que se distinguen diferentes ciclos On-Off para diferentes potencias. b) Gráfica de responsividad frente a potencia.**

Volvemos a realizar el cálculo de la responsividad, ahora en función de la potencia. En la Figura 5-5 b) podemos ver la gráfica de responsividad en función de la potencia y, como era de esperar por lo visto con anterioridad, la responsividad disminuye mientras que la potencia aumenta.

Los valores numéricos de la responsividad en función de la potencia son los que se encuentran en la Tabla 5-2.

P ( $\mu$ W)	56.4	112.8	169.2	225.6	282
R (A/W)	0.0776	0.054	0.0451	0.042	0.0379

**Tabla 5-2: Valores numéricos de la responsividad frente a la potencia del LED, correspondientes a la Figura 5-5**

Los tiempos de respuesta que se pueden obtener de gráficas anteriores están en el rango de entre 100-200 ms.

## 6 Conclusiones y trabajo futuro

---

### 6.1 Conclusiones

Durante este TFG se han desarrollado los procedimientos a seguir para la fabricación de un fotodetector con material bidimensional y se han llevado a cabo las diferentes caracterizaciones de dicho fotodetector.

Hemos montado y comprobado el correcto funcionamiento de los montajes experimentales a través de fotodetectores basados en MoS<sub>2</sub>, obteniendo unos resultados que se asemejan y son compatibles con los que se reportan en la literatura, obteniendo una movilidad  $\mu = 1.9 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$  y una responsividad  $R = 163.6 \text{ mA/W}$ , en este caso para el LED de 660 nm, siendo la máxima responsividad obtenida para el MoS<sub>2</sub>.

Se ha fabricado un fotodetector basado en fósforo negro, demostrando que este fotodetector responde en un rango que va desde el UV (ultravioleta) hasta el NIR dado que tenemos resultados desde 375 nm hasta 1550 nm. Además, hemos obtenido valores de movilidad  $\mu = 0.2152 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$  y de responsividad  $R = 23.5 \text{ mA/W}$  (en este caso para 1550 nm), resultados totalmente compatibles con los que se han reportado en artículos científicos muy recientes. También se ha demostrado que la velocidad de respuesta en el infrarrojo es de unos 120 ms.

Los resultados de este TFG demuestran el potencial que posee el fósforo negro para su uso en aplicaciones de telecomunicación en el rango de infrarrojos.

### 6.2 Trabajo futuro

Durante el desarrollo de este TFG se ha visto que el fósforo negro sufre una degradación bastante rápida en condiciones ambientales normales. Dado el potencial que ha demostrado este material para aplicaciones de telecomunicación, se plantea buscar una solución para frenar esta degradación.

Otras opciones, que ya hemos empezado a probar, es depositar moléculas orgánicas sobre nuestro material bidimensional, con el fin de aumentar su fotocorriente, fotodetección y su rendimiento.

## 7 Publicaciones

---

Durante la realización de este TFG se ha publicado el siguiente artículo:

Rubio-Bollinger, G., Guerrero, R., de Lara, D. P., Quereda, J., Vaquero-Garzon, L., Agraït, N., Bratschitsch, R. & Castellanos-Gomez, A. (2015). Enhanced Visibility of MoS<sub>2</sub>, MoSe<sub>2</sub>, WSe<sub>2</sub> and Black-Phosphorus: Making Optical Identification of 2D Semiconductors Easier. *Electronics*, 4(4), 847-856.

# Referencias

---

1. Novoselov, K. S. *et al.* Two-dimensional atomic crystals. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **102**, 10451–3 (2005).
2. Lv, P., Zhang, X., Zhang, X., Deng, W. & Jie, J. High-Sensitivity and Fast-Response Graphene/Crystalline Silicon Schottky Junction-Based Near-IR Photodetectors. *Electron Device Letters, IEEE* **34**, 1337–1339 (2013).
3. Photoresistor. *Wikipedia* (2015). at <<https://en.wikipedia.org/wiki/Photoresistor>>
4. Tavernier, F. & Steyaert, M. *High-speed optical receivers with integrated photodiode in nanoscale CMOS*. **5**, (Springer Science & Business Media, 2011).
5. Kadanoff, L. P. More is the Same; Phase Transitions and Mean Field Theories. *J. Stat. Phys.* **137**, 777–797 (2009).
6. Novoselov, K. S. *et al.* Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science* (80-. ). **306**, 666–669 (2004).
7. Bonaccorso, F., Sun, Z., Hasan, T. & Ferrari, A. C. Graphene photonics and optoelectronics. *Nat. Photonics* **4**, 611–622 (2010).
8. Xia, F., Farmer, D. B., Lin, Y. & Avouris, P. Graphene field-effect transistors with high on/off current ratio and large transport band gap at room temperature. *Nano Lett.* **10**, 715–718 (2010).
9. RadisavljevicB., RadenovicA., BrivioJ., GiacomettiV. & KisA. Single-layer MoS2 transistors. *Nat Nano* **6**, 147–150 (2011).
10. Chhowalla, M. *et al.* The chemistry of two-dimensional layered transition metal dichalcogenide nanosheets. *Nat. Chem.* **5**, 263–275 (2013).
11. Ayari, A., Cobas, E., Ogundadegbe, O. & Fuhrer, M. S. Realization and electrical characterization of ultrathin crystals of layered transition-metal dichalcogenides. *J. Appl. Phys.* **101**, 14507 (2007).
12. Kozlova, O. & Nelayev, V. Electronic properties of two-dimensional MoS2 investigated by ab initio simulation.
13. Warschauer, D. Electrical and optical properties of crystalline black phosphorus. *J. Appl. Phys.* **34**, 1853–1860 (1963).
14. Li, L. *et al.* Black phosphorus field-effect transistors. *Nat Nano* **9**, 372–377 (2014).
15. Castellanos-Gomez, A. *et al.* Isolation and characterization of few-layer black phosphorus. *2D Mater.* **1**, 25001 (2014).



16. Thompson, S. E. & Parthasarathy, S. Moore's law: the future of Si microelectronics. *Mater. today* **9**, 20–25 (2006).
17. Martín, J. M. A. *Introducción a la ciencia de materiales: técnicas de preparación y caracterización*. (Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 1993). at <<https://books.google.es/books?id=LQdvFXZ6ndUC>>
18. Dolan, G. J. Offset masks for lift-off photoprocessing. *Appl. Phys. Lett.* **31**, 337–339 (1977).
19. Steele, A. C.-G. and M. B. and R. M. and V. S. and L. J. and H. S. J. van der Z. and G. A. Deterministic transfer of two-dimensional materials by all-dry viscoelastic stamping. *2D Mater.* **1**, 11002 (2014).
20. Yin, Z. *et al.* Single-layer MoS<sub>2</sub> phototransistors. *ACS Nano* **6**, 74–80 (2011).
21. Blanter, S. I. Characterization of few-layer black phosphorus. (Delft University of Technology, 2014).

